

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA MATERIÁLU

Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3911R018 Materiály a technologie
Zaměření: Materiálové inženýrství

LOM SPOJOVACÍHO HŘÍDELE KOMPRESORU

FRACTURE OF A COMPRESSOR CONNECTING SHAFT

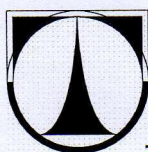
KMT – B – 173

David navrátil

Vedoucí práce: doc.Ing. Břetislav Skrbek, CSc.

Počet stran: 96
Počet tabulek: 5
Počet obrázků: 115
Počet grafů: 21
Počet příloh: 3

Datum 27.05.2011



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení

David N A V R Á T I L

studijní program

2341 B Strojírenství

obor

Materiály a technologie

zaměření

Materiálové inženýrství

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

Lom spojovacího hřídele kompresoru

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznamte se se základy fraktografie a teorie únavového porušení.
2. Prostudujte výsledky výchozích zpráv a navrhnete doplňující experimenty.
3. Proved'te metalografické a fraktografické hodnocení.
4. Navrhnete závěry a hypotézu vzniku lomu.

Forma zpracování bakalářské práce:

- průvodní zpráva v rozsahu 25 - 40 stran
- přílohy

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

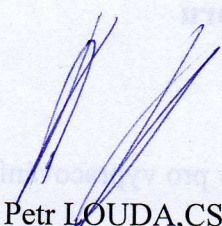
- [1] Koutský, J., Jandoš.: Lomy ocelových částí. SNTL Praha 1976.
[2] Skrbek, B. : Interní zprávy č. 842 a 853, r. 2009, TEDOM s.r.o. divize Motory, Jablonec n.N.


Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.

Konzultant bakalářské práce :




prof. Ing. Petr LOUDA, CSc.
vedoucí katedry


doc. Ing. Miroslav MALÝ, CSc.
děkan

V Liberci dne 18.10.2010

Platnost zadání bakalářské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ). Termíny odevzdání bakalářské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

Anotace

Tato bakalářská práce řeší problematiku analýzy poruch. Teoretická část se věnuje literárnímu průzkumu současných poznatků v oblasti fraktografie, včetně teoretického základu šíření trhliny z pohledu lomové mechaniky. Experimentální část se pak zabývá aplikací získaných poznatků při zjišťování příčiny porušení a popisu mechanismu lomu konkrétního hřídele.

Annotation

This bachelor thesis deals with issues of failure analysis. The theoretical part deals with the literary research of current knowledge in the field of fractography, including the theoretical basis of crack propagation in terms of fracture mechanics. The experimental section deals with the application of this knowledge to identify the source and description of a specific shaft fracture.

Klíčová slova

fraktografie, metalografie, lomová mechanika, trhlina, lom, únava, SEM

Keywords

fractography, metallography, fracture mechanics, crack, fracture, fatigue, SEM

Bibliografická citace

NAVRÁTIL, D.: Lom spojovacího hřídele kompresoru, Liberec, TUL Fakulta strojní 2011,
vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

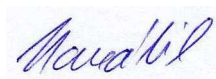
Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce.

Datum: 27.05.2011

Podpis:



Poděkování

Děkuji vedoucímu své práce doc.Ing. Břetislavovi Skrbkovi CSc.a RNDr. Věře Vodičkové, Ph.D.za všestrannou pomoc, připomínky a hlavně čas, který mi věnovali při tvorbě této práce.

Obsah

1. Úvod	11
1.1 HISTORIE FRAKTOGRAFIE	11
1.2 VÝZNAM FRAKTOGRAFIE	11
1.3 CÍLE FRAKTOGRAFIE	12
2. TEORETICKÁ ČÁST	12
2.1 TEORIE LOMU V KOVECH	12
2.1.1 LOM, TRHLINA, ZÁKLADNÍ POJMY	12
2.1.2 ZÁKLADY LINEÁRNÍ ELASTICKÉ LOMOVÉ MECHANIKY	14
2.1.3 TEORIE VZNIKU ZÁRODKŮ PORUŠOVÁNÍ	15
2.1.4 TRANZITNÍ LOMOVÉ CHOVÁNÍ	18
2.2 KLASIFIKACE LOMŮ	20
2.2.1 LOMY STATICKÉ A ÚNAVOVÉ	20
2.2.2 LOMY KŘEHKÉ A HOUŽEVNATÉ	23
2.2.3 LOMY TVÁRNÉ A ŠTĚPNÉ	25
2.2.4 LOMY INTERKRISTALICKÉ A TRANSKRISTALICKÉ	26
2.2.5 LOMY PŘI TEČENÍ	27
2.2.6 LOMY VYVOLANÉ PŮSOBENÍM PROSTŘEDÍ	28
2.3 METODY STUDIA LOMOVÝCH PLOCH	29
2.3.1 SVĚTELNÁ MIKROSKOPIE	29
2.3.1.1 CHARAKTERISTICKÉ HODNOTY PRO MIKROSKOPII	30
2.3.1.2 PŘÍPRAVA VZORKU	33
2.3.2 ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE	34
2.4 ZKOUŠENÍ ODOLNOSTI MATERIÁLU VŮČI KŘEHKÉMU PORUŠENÍ	36
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	40
3.1 POPIS SOUČÁSTI A ZKUŠEBNÍ POSTUP	40
3.2 POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ	41
3.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ	41
3.3.1 METALOGRAFICKÁ ANALÝZA	41
3.3.2 FRAKTOGRAFICKÁ ANALÝZA	44
3.3.2.1 MAKROSKOPICKÁ ANALÝZA, SVĚTELNÁ MIKROSKOPIE	44
3.3.2.2 ANALÝZA POMOCÍ ELEKTRONOVÉ MIKROSKOPIE	46
3.4 SHRNUÍ A DISKUZE	51
3.5 ZÁVĚR	53

Seznam vybraných zkratek a symbolů

Zkratka\Symbol	Jednotka	Popis
a	m	hlavní poloosa eliptické trhliny
A	1	aperatura
d	m	konvenční hodnota zrakové vzdálenosti
DR	[-]	decohesive rupture, dekohezivní praskání
E	Pa	modul pružnosti v tahu
EDX	[-]	energy dispersive X-ray spectroscopy
$f_{1,2,3}$	m	polohový vektor
f_{ob}	m	ohnisková vzdálenost objektivu
f_{ok}	m	ohnisková vzdálenost okuláru
H	m	hloubka ostrosti
KC	$J.m^{-2}$	vrubová houževnatost
K_I	$N.mm^{-3/2}$	faktor intenzity napětí
K_{IC}	$N.mm^{-3/2}$	lomová houževnatost
LELM	[-]	lineárně elastická lomová mechanika
n	1	index lomu
SEM	[-]	skenovací elektronový mikroskop
t	s	čas
T	K	teplota
TEM	[-]	transmisní elektronový mikroskop
TTS	[-]	tearing topography surface – trhlinová morfologie
Y	1	korekční funkce
Z	1	zvětšení
α	rad	poloviční úhel vstupu odraženého světla do objektivu
γ_s	$N.m^{-1}$	povrchová energie
Δ_o	m	optická délka tubusu mikroskopu
ε	1	poměrné prodloužení
σ	Pa	napětí

1 Úvod

V dobách, kdy Země byla ještě mladá a lidstvo neznalo televize a splachovací záchody, bylo široce přijímaným veřejným názorem, že náhodné jevy, jako například poruchy, jsou dílem Boží vůle. Pokud se při nehodě někdo zranil či zemřel, připouštěli společenské normy jako příčinu selhání také zásah sil pekelných. Protože se dosud tuto souvislost nepodařilo potvrdit technickým měřením či pokusem, začala se paralelně s tímto myšlenkovým proudem vyvíjet věda o studii lomových ploch materiálů – fraktografie.

1.1 Historie fraktografie

Přirozená potřeba lidské společnosti, potřeba pokroku a zdokonalování technologií, s sebou vždy nesla požadavek jistých zkušeností. Dalším neméně typickým lidským rysem je řešení problémů až ve chvíli, když nastanou. Tyto zcela bezprostřední požadavky, posílené například tragickou havárií, pravděpodobně vedly v průběhu vývoje lidské společnosti k nutnosti pochopení příčin poruch, a také k ověření teoretických předpovědí poruch.

Pravděpodobně se tak dělo již při tvorbě kamenných nástrojů, v éře takto pojmenované, tedy v době kamenné. Dokládají to mnohé archeologické nálezy nářadí, zbraní a jiných nástrojů z tvarovaného kamene, které i laikovi jasně ukazují, že prehistorický člověk věděl, jak si vybrat správný kus skály s příznivým lomovým chováním. Z doby bronzové se zachovaly důkazy, že tehdejší kováři studovali vazby mezi metodami výroby a zpracování bronzových odlitků a jejich vlastnostmi pomocí lomů. Za nejranější publikaci s popisem lomů se považuje dílo De La Pirotechnia italského průkopníka slévárnictví Vannoccia Biringuccia. Dílo z roku 1540 obsahuje mimo jiné popis vzhledu lomů a jejich vztah k jakosti kovů. Další pokrok přinesl v roce 1722 francouzský vědec René-Antoine Ferchault de Réaumur svou knihou, kde líčí makroskopickou a mikroskopickou strukturu lomových ploch oceli. Velkým zlomem ve vývoji fraktografie bylo vynalezení mikroskopu a doslova průlomem bylo zahájení výroby mikroskopů firmou Zeiss v roce 1847, což rozšířilo tento produkt mezi širokou (nejen) technickou veřejnost. Tato událost, rozvoj metalografie a také probíhající všeoborová průmyslová revoluce vedla k nutnosti komplexnějšího pohledu na studium povrchu lomů. V 19. století se již zohledňoval proces tuhnutí, tedy i vliv smršťení kovů za následného vzniku napětí. Takto podrobné průzkumy lomových ploch si časem pochopitelně vynutili třídění lomů, jejich klasifikaci. Jmenovitě se touto problematikou zabýval E. F. Dürre ve své dizertační práci z roku 1868. Podrobně popisuje textury v odlitcích. Lomy klasifikoval podle vzhledu, ale nepodařilo se mu zcela stanovit užité principy. Pozorování vnitřní stavby kovů se mimo jiného zabýval i Adolf Martenz, německý metalurg a průkopník kalení [1, 2, 3, 4].

Základy moderní fraktografie položil Carl A. Zapffe, který vydal řadu prací o lomovém procesu. Jeho poznatky vedly k rozvoji technik pro fotografování lomových ploch při velkých zvětšeních. Dnešní podobu dostala fraktografie zejména díky rozvoji elektronového mikroskopu. Výhody metod pozorování elektronovým mikroskopem oproti světelnému jsou hlavně vyšší rozlišovací schopnost a také velká hloubka ostrosti, jenž nám dovolí pozorovat členité povrchy lomů [1, 2, 3, 4].

1.2 Význam fraktografie

Fraktografie je studium lomových povrchů materiálu. Fraktografie se uplatňuje ke stanovení příčiny poruchy v různých technických oborech. Středem zájmu fraktografie je také modelování růstu trhlin. Každý proces růstu trhliny totiž po sobě v materiálu zanechá specifické znaky, s jejichž pomocí lze určit mechanismus lomu. Ten sám o sobě je sice velice zajímavým poznatkem, avšak pro praktické

využití je nejdůležitější určit zdroj trhliny a původ její iniciace. Jako nástroj k určení místa iniciace trhliny se nejčastěji využívá makroskopická analýza, nebo ohledání lomové plochy pomocí mikroskopické analýzy. Lom může iniciovat široké spektrum příčin.

1.3 Cíle fraktografie

Primárním cílem fraktografického šetření je určení příčiny a způsobu vzniku poruchy studiem vlastností lomových ploch. Každý průběh růstu trhliny má za následek specifickou charakteristiku morfologie povrchu, pomocí které můžeme určit právě příčinu poruchy. Sekundárním cílem je pak získávání nových poznatků o průběhu a mechanismu procesů porušování.

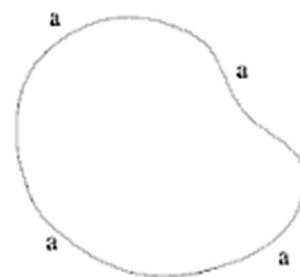
2 Teoretická část

2.1 Teorie lomu v kovech

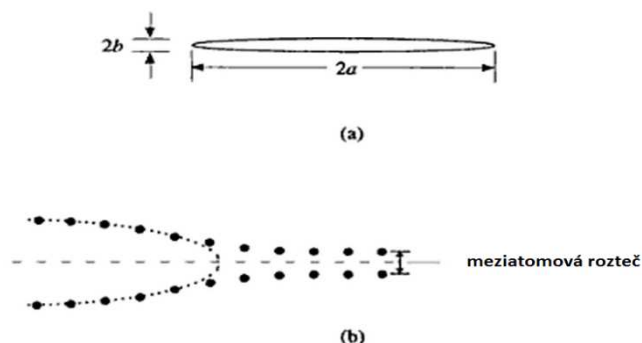
2.1.1 Lom, trhlina, základní pojmy

Lom je porušením homogenity materiálu v celém průřezu. **Trhlina** je porušením homogenity materiálu v části průřezu. K porušení homogenity obecně dochází působením vnitřních nebo vnějších napětí, které překročí mezní hodnotu. Lomové plochy vznikají rostoucími nebo množícími se trhlinami. K analýze morfologie lomové plochy je klíčové pochopení šíření trhliny. Na šíření trhliny je správné nahlížet prostorově, avšak není to vždy bezpodmínečně nutné, také to pohled na věc značně komplikuje a navíc mnoho poznatků o trhlině můžeme získat zjednodušením na rovinný povrch.

Pro pochopení mikroskopické podstaty termínu trhlina, je nejlepší provést si demonstraci na jednoduchém případě, který ve své práci uvádí Hull [5]. Uvažujme tuhé elastické pevné těleso. Uzavřená smyčka a-a-a-a na obrázku 2.1.1-1 představuje hladkou spojitou plochu tělesa, která v obecném případě není rovinná. Předpokládejme, že všechny meziatomární síly a vazby napříč povrchem jsou neaktivní, a že díky malému posunutí působícímu na vnější povrch se bude těleso deformovat elasticky. Za předpokladu, že existuje složka síly kolmá k a-a-a-a, se bude tuhé těleso rozdělovat napříč tímto povrchem a tvořit dvě nové plochy. Oddělení ploch je největší ve středu. Pokud budou meziatomární síly aktivovány, se stále působícím vnějším posunutím, můžou povrchy zůstat odděleny, ale vzniknou místní změny ve tvaru ploch na hranicích a-a-a-a vlivem krátkodosahových meziatomárních sil. Výsledkem je trhlina v tělese, s hranicí trhliny nazývanou **čelo trhliny**, ležící v blízkosti původní smyčky a-a-a-a [5].



Obr. 2.1.1-1 Smyčka [5].

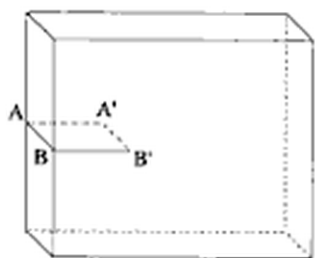


Obr. 2.1.1-2: (a) Konvenční způsob zobrazování trhliny v průřezu jako elipsa. (b) Schematická reprezentace tvaru kořene trhliny založená na vlivu vnějších sil a meziatomových sil [5].

Otevření trhliny závisí na elastických vlastnostech materiálu a na externě působícím posunutí. Pro jednoduchost předpokládejme, že trhlina je rovinná, takže a-a-a-a leží v jedné rovině. Tvar otevřené trhliny lze ilustrovat uvažováním oblasti kolmé k oběma povrchům trhliny a tečné k čelu trhliny. To nám dává více známou představu o rovinné reprezentaci trhliny na obrázku 2.1.1-2(a). Obvykle je zakreslena jako elipsa s velkým poměrem hlavní a vedlejší osy. K určení tvaru trhliny na atomární úrovni v pružném materiálu je nezbytné vzít v úvahu jednak vnější síly tak i místní meziatomové síly mezi dvěma plochami trhliny viz Obr. 2.1.1-2(b). Na počátku růstu trhliny můžeme atomové vazby v materiálu bezprostředně před kořenem trhliny uvažovat jako roztážené k mezní hranici. Další oddělení ploch trhliny způsobí rozbití vazeb a šíření trhliny. Pokud je materiál dokonale pružný, a je v dokonalém vakuu, pak zeslabení vnějších sil vede k obnově vazeb na kořeni trhliny a zkrácení trhliny. Reverzibilní chování tohoto typu je velmi vzácně pozorováno a neděje se tak u technicky důležitých materiálů. Ve většině pevných látek naopak dochází vysokou koncentrací napětí na kořeni trhliny k nevratnému procesu plastické deformace, která způsobí další rozevření trhliny tak, že úplné uzavření trhliny nenastane, ani pokud jsou vnější síly zcela odstraněny. Kromě toho chemické reakce na vysoce reaktivní čerstvě tvořené lomové ploše brání vazbám k opětovnému zavazbení [5].

Tento výše uvedený myšlenkový experiment popisuje trhliny v souvislostech s rozdělením tuhého tělesa na atomární úrovni a **kořen trhliny** zde představuje hranici mezi odděleným a neodděleným materiálem. Tento koncept má zásadní význam pro výklad faktografických úkazů ve vysokém přiblížení, ale pro pozorování při malých zvětšeních velkou hodnotu nemá, protože pro odlišné stupně zvětšení mají pochopitelně různé rozměry různou relevanci. Velmi nepravidelná morfologie většiny lomových ploch vyplývá z růstu trhliny, která se v jejím kořeni může skládat z velkého počtu trhlín menších rozměrů. Přes všechny tyto fakty lze ale schéma na obrázku 2.1.1-2(a) považovat za obecný popis příčného průřezu trhliny, nezávislý na měřítku. Zrovna tak je možné popsat lomovou plochu trhliny jako hladký souvislý povrch, pokud reálná plocha splňuje podmínku, že rozsah drsnosti na povrchu lomu je mnohem menší než celkové rozměry trhliny [5].

Trhlina je tedy, jak už bylo řečeno, částečný lom tuhého tělesa. Pokud se trhlina šíří napříč materiálem, pak materiál odděluje na dvě části, z nichž každá část má své lomové plochy. A stopy na těchto lomových plochách jsou zdrojem informací pro analýzu toho, jak se trhlina šířila.



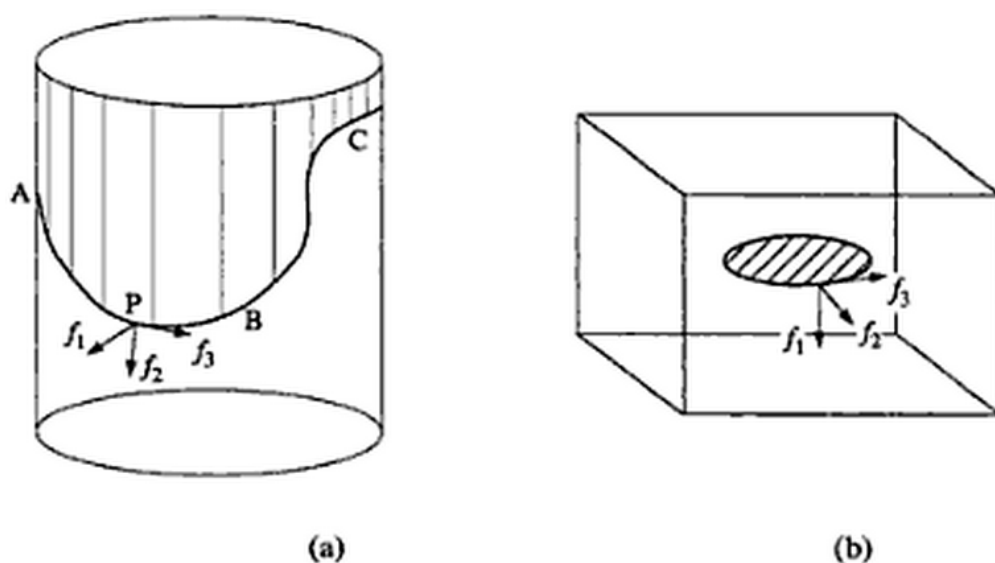
Ve dvourozměrném vyobrazení trhliny na obrázku 2.1.1-2(a) je délka trhliny $2a$. Definování geometrie trhliny v reálném trojrozměrném prostoru je problematičtější, s výjimkou zjednodušených tvarů jako na obrázku 2.1.1-3, kde je čelo trhliny rovné a rovnoběžné na stranu AB vzorku [5].

Obr. 2.1.1-3: Rovinné čelo trhliny na ploché desce [5].

Orientace čela trhliny a směr růstu trhliny v každém okamžiku definují vývoj trhliny, který lze popsat třemi ortogonálními jednotkovými vektory. Uvažujme trhlinu šířící se hladkým souvislým povrchem jako je tomu na obrázku 2.1.1-1 a předpokládejme, že tento povrch je součástí zakřiveného válcového tělesa zakresleného na obrázku 2.1.1-4(a). Oblast se svislým šrafováním je trhlina a čelo trhliny ABC je hranice šrafované oblasti. V libovolném bodě P na kořeni trhliny jsou jednotkové vektory definovány takto [5]:

- f_1 – jednotkový vektor kolmý na rovinu trhliny
- f_2 – jednotkový vektor rovnoběžný se směrem růstu trhliny
- f_3 – jednotkový vektor rovnoběžný s tečnou k čelu trhliny

Jelikož jsou ony tři vektory ortogonální, vyplývá z toho, že pokud známe rovinu trhliny a orientaci trhliny, může určit směr růstu trhliny. Pro rovinné trhliny, Obr. 2.1.1-4(b) je vektor f_1 stejný ve všech bodech čela trhliny [5].



Obr. 2.1.1-4: (a) Zakřivené čelo trhliny na válcovém tělese. (b) Kruhová trhlina s konstantním vektorem f_1 [5].

Vzhled lomové plochy závisí na cestě lomu, který se odvíjí z průběhu výše popsaných jednotkových vektorů ve všech bodech čela trhliny. Průběh jednotkových vektorů je závislý na mikromechanismu deformace, který předchází lomu a ten zase závisí na mikrostrukturu materiálu [5].

2.1.2 Základy lineární elastické lomové mechaniky

Lomová mechanika je obor mechaniky zabývající se studiem šíření trhlín v materiálu. Podmětem pro rozvoj tohoto vědního oboru byla skutečnost, že se v provozu materiály někdy porušují při nižším nominálním napětí, než je mez kluzu, přičemž příčinou lomu mohou být defekty, jako jsou právě trhliny.

Lineární elastická lomová mechanika (dále jen LELM) je nejstarší obor lomové mechaniky a je základem pokročilejších teorií lomové mechaniky. Postupy LELM jsou platné pro pružný materiál, předpokládají totiž lineární závislost mezi napětím a deformací. Prakticky ji lze například použít pro stanovení kritického napětí nebo kritické délky trhliny pro její nestabilní růst. V LELM existují dva přístupy k popisu napěťových a deformačních podmínek na čele trhliny [3, 6]:

- **Energetická analýza**
Griffith – parametr G (rychlost uvolňování elastické energie neboli hnací síla trhliny)
- **Napěťová analýza**
Irwin (Kinz) – parametr K (součinitele intenzity napětí)

Kritické hodnoty těchto parametrů K_{IC} a G_{IC} (určené za podmínek rovinné deformace) vyjadřují materiálovou charakteristiku nazývanou lomová houževnatost.

Fraktografie je s lomovou mechanikou úzce spjata a její znalost je nutná pro pochopení příčin poruch. Bohužel této studii nepřísluší teorie LELM podrobně rozebírat, protože by pro potřeby hlavní části práce byly zbytečně detailní, ale vzhledem k tomu že LELM poskytuje základní matematický popis problematiky šíření trhliny a navíc tato studie na modely LELM často odkazuje, považují za nutné, aby alespoň základy těchto teorií byly k dispozici formou přílohy (příloha A).

2.1.3 Teorie vzniku zárodků porušování

Griffithova teorie popsaná v příloze A předpokládá, že vlastní lom začíná růstem necelistvostí, které v materiálech vznikají již při jejich výrobě. Úpravou rovnice (příloha A15) Griffithovy energetické bilance lze, například při dosazení materiálových charakteristik pro ocel, jednoduše dokázat, že poloviční délka a_{KR} této původní necelistvosti je nereálně velká (pro ocel $a_{KR} = 10^{-1} \text{ mm}$) [6, 7].

$$a_{KR} = \frac{2E \cdot \gamma_s}{\pi \cdot \sigma^2}, \text{ rovnice (1)}$$

σ – normálové napětí (Pa)

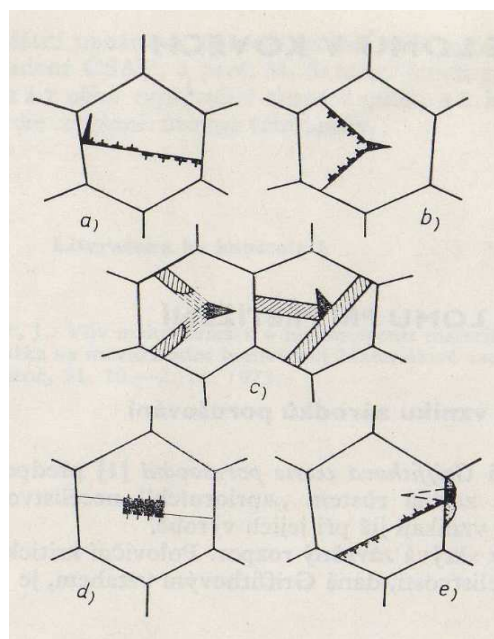
E – modul pružnosti v tahu (Pa)

γ_s – povrchová energie ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)

Také bylo dokázáno, že lomu vždy předchází, plastická deformace, a že kritické lomové napětí je mnohem menší než teoretická pevnost daná silou vazeb mezi atomy. Griffithovy úvahy o původu trhliny byly tedy pod tíhou těchto rozporů korigovány dislokačními teoriemi iniciace (nukleace) poruch soudržnosti [7].

Vznik zárodků porušování

Podle schéma na obrázku 2.1.3-1 tedy existuje množství teorií, jak vznikne zárodek štěpné mikrotrhliny. Všechny teorie se shodují v tom, že k nukleaci prvotních mikrotrhin dochází plastickou deformací, za působení smykového napětí. O nukleaci trhlin v souvislosti s materiálem, ve kterém vznikají, pojednává samostatná část této kapitoly [7].



Obr. 2.1.3-1: Vznik zárodků (nukleace) trhlin [7]:

(a) Zener, Strch, Mott

nakupením dislokací u hranic zrn

(b) Cottrell

interakcí dislokací z protínajících se kluzových rovin

(c) Sleeswyk, Hull, Honda

interakcí dislokací deformačních dvojčat, nebo při nárazech rychle rostoucích dvojčat

(d) Kochendörfer, Scholl

anihilací dislokací opačného znaménka, pohybujících se v paralelních rovinách skluzu

(e) Mahon, Cohen, Smith, Almond

díky přítomnosti křehké fáze v základní hmotě, například karbid na hranici zrna

Růst zárodků porušení

Zárodek trhliny roste pod účinkem napětí, které trhlínu vytvořilo. K nestabilnímu šíření dojde v okamžiku, kdy trhlína dosáhne kritické délky. Napětí pro počátek nestabilního růstu lze určit z rovnice (příloha A15) Griffithovy energetické bilance. Zopakujme, že trhlína je délky $2a$, γ_s je povrchová energie a E je Youngův modul [6, 7].

$$\sigma_{KR} = \left(\frac{2E \cdot \gamma_s}{\pi \cdot a} \right)^{1/2}, \text{ rovnice (2)}$$

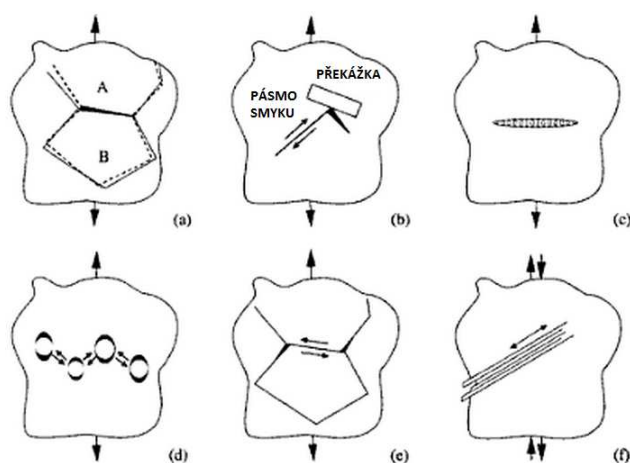
Kontakt s první pevnou překážkou

Jakmile dosáhne mikrotrhlína kritického rozměru, šíří se nestabilně za poklesu celkové energie soustavy. Ke změně dojde v okamžiku, kdy šířící se porušení narazí na první pevnou překážku, jejíž překonání již odpovídá Griffithově teorii [6, 7].

Nukleace trhlin vlivem deformace

Při fraktografickém šetření je velice důležité určit místo, kde se trhlína nukleuje, a tím získat určitou představu o důvodech poruchy. Z předchozího textu víme, že existuje množství teorií, jak vznikne zárodek mikrotrhliny. Všechny teorie se shodují v tom, že k nukleaci prvotních mikrotrhlin dochází plastickou deformací, za působení smykového napětí. Další popis se věnuje rozdělení nukleace trhlin podle způsobu deformace, která je iniciuje, v souvislosti s materiálem ve kterém vzniká.

Podrobnosti nukleace jsou závislé na konkrétním materiálu, hlavně na mikrostrukturálních faktorech. Lom je projevem materiálu na napětí nebo deformaci působící externě nebo interně vlivem například teplotního gradientu, smršťování, difúze nebo chemických změn. Proces lomu zahrnuje nukleaci a šíření trhlin. Rozdíl mezi nukleací a šířením není vždy jednoznačný. Velké trhliny často vyplývají ze sloučení množství malých trhlin. Uvedené příklady jsou pro materiály s relativně jednoduchými mikrostrukturami, ale mají význam i pro látky s komplexní mikrostrukturou [5].



Obr. 2.1.3-2: Příklady nukleace trhlin vlivem deformace [5]:

- (a) pružná neslučitelnost
- (b) plastické deformace krystalové mřížky
- (c) praskání v polymerech
- (d) koalescence dutin
- (e) skluz po hranicích zrn
- (f) perzistentní skluzové pásmo vzniklé cyklickým napětím

Obr. 2.1.3-2 ukazuje šest různých způsobů, jak se trhliny nukleují vlivem elastické nebo plastické deformace. Tento seznam nukleacích mechanismů není úplný a existuje zde i určité překrývání myšlenek a konceptů u jednotlivých způsobů. Některé trhliny se tvoří v průběhu

zatěžovacího cyklu a nakonec vedou k úplnému lomu. Jiné se formují již před vystavením vnějšímu zatížení [5].

a) Trhliny nukleované z důvodu elastické neslučitelnosti

U materiálů obsahujících množství velmi tvrdé tuhé fáze se tyto trhliny nukleují na rozhraní mezi zrny a uvnitř zrn v důsledku napětí vlivem elastické neslučitelnosti sousedních zrn, jako je to vidět například na obrázku 2.1.3-2(a), který představuje dvě zrna A a B. Zrna se mohou lišit v krystalografické orientaci nebo chemickým složením a jsou oddělena dobře definovatelným rozhraním. Protože je zde rozdílnost ve složení a orientaci, moduly pružnosti zrna jsou různé. To znamená, že vnější namáhání nebo vnitřní pnutí způsobuje různé elastické deformace dvou zrn. To může vést k vysokým místním napětím, která jsou uvolněna vznikem trhliny. Tento způsob nukleace trhlin se vyskytuje u materiálů jako keramika nebo beton [5].

b) Trhliny nukleované plastickou deformací v krystalickém materiálu

K takovéto trhlině dochází při nízkých teplotách v krystalických materiálech (jako jsou kovy a keramika) deformovaných smykem. Na úrovni mikrostruktury se tak děje skluzem jednotlivých dislokací nebo pohybem pole dílčích dislokací (dvojčatění). Smyk může být lokalizován do úzkých pásem. Při styku smykového pásma s mikroskopickou strukturální překážkou, například na hranicích zrn nebo s jinými částicemi, vzniká na špičce tohoto pásma velmi vysoké místní napětí. To vede k nukleaci trhliny, viz Obr. 2.1.3-2(b). Krystalová struktura materiálu a směr zatěžujícího napětí určuje rovinu skluzu či dvojčatění a také směr smyku. Rovina, v které se trhliny nukleují je rovněž ovlivněna krystalovou strukturou a pevností styčné plochy překážky. V příkladu na obrázku 2.1.3-2(b) se trhlinka tvoří krystalografickým štěpením ve stejném zrně jako je pásmo smyku. Vysoká koncentrace napětí může být uvolněna plastickou deformací nebo nukleací trhliny. Podmínka vzniku trhliny závisí na mnoha proměnných včetně velikosti smykového namáhání, pevnosti překážky, kinetice deformace a dalších. U některých křehkých materiálů se tvoří trhliny, protože nejsou schopny uvolnit vysoké koncentrace napětí způsobené plastickou deformací [5].

c) Trhliny nukleované praskáním

U amorfních organických polymerů tvoří dlouhé molekulové řetězce náhodnou prostorovou zmeť. V reakci na napětí se jednotlivé segmenty řetězců otáčejí a při velkých deformacích se eventuelně zarovnávají ve směru maximální deformace. Dochází buďto ke smykovým deformacím nebo k tvorbě rovinných polí dutin kolmých na tahové napětí zapříčiňující vznik trhliny. Nukleace trhliny praskáním je znázorněno na obrázku 2.1.3-2(c). Dutiny jsou zde odděleny svazky vysoce uspořádaných polymerních molekul. Nakonec se molekuly rozpletou, nebo zlomí tak, aby v prostoru vytvořili trhlinku [5].

d) Trhliny nukleované koalescencí dutin

Tento mechanismus se vyskytuje u mnoha tvárných materiálů, které obsahují tuhé částice. Podrobnosti závisí na mikrostruktuře konkrétního materiálu. Během deformace se u krystalických materiálů tvárná matrice deformuje skluzem, anebo střihovým mechanismem v případě amorfních a semikrystalických materiálů. Tuhé částice se nedeformují. Na rozhraní částice a matrice dochází k tvorbě dutin, jak je to znázorněno na obrázku 2.1.3-2(d). Jakmile dojde k nukleaci, dutiny rostou dalším smykem matrice, nebo vlivem vysokých teplot, či od difúzních procesů. Nakonec na sebe napěťová pole rostoucích dutin vzájemně působí a smyk matrice se přesouvá do oblastí mimo částice, což vede k separaci a k vytvoření trhliny. Trhliny se skládají z nepravidelného pole dutin. To dokládá fakt, že se trhliny mohou formovat z pole menších trhlin, které v tomto případě, jsou trhlinami na hranicích tuhých částic [5].

e) Praskliny nukleované skluzem po hranicích

Při dostatečně vysokých teplotách nebo při dostatečně velkých deformacích polykrystalických materiálů (v menší míře i sférolitických semikrystalických polymerů) dochází k posouvání těchto poměrně tuhých bloků přes sebe. K relaxaci na hranicích zrn dochází ještě před deformací bloků, takže je skluz po hranicích zrn převládajícím způsobem deformace. Když je proces skluzu narušen v rozích zrna, tvoří se trhliny ve tvaru klínu, jak je znázorněno na obrázku 2.1.3-2(e). Tuhé částice, které mohou být přítomny na hranicích, vedou při skluzu po hranicích zrna ke vzniku dutin. Ty rostou, splývají a tvoří trhliny na hranicích způsobem obdobným tvorbě dutin na obrázku 2.1.3-2(d) [5].

f) Trhliny nukleované cyklickým napětím, (mechanická únava)

Všechny příklady nukleace trhlín výše uvedené vznikají v důsledku monotónního zatížení. Mechanická únava nastane působením cyklického namáhání pod kritickou úrovní zatížení pro nukleaci a šíření trhlín při monotónním zatěžování. Cyklické namáhání způsobuje deformace, které se hromadí a nakonec postupně vytvářejí trhliny. Schéma na obrázku 2.1.3-2(f) představuje jediné zrna na povrchu polykrystalického materiálu. K posuvu dochází v rovině skluzu a cyklické namáhání vede k pohybu tam a zpět blížících rovnoběžných rovin v úzkém pásmu, neboli pásmu známém jako perzistentní skluzové pásmo (pásmo permanentního skluzu). Na povrchu se vyvíjí jakési vroubkování s trhlinou jako obrysem, které koncentruje napětí a nakonec vede k vytvoření trhliny v rovině skluzu [5].

g) Trhliny v nukleované křehkém povrchu

Když jsou namáhány tvárné materiály, potažené povrchovou vrstvou křehkého materiálu, může předčasná prasklina křehké povrchové vrstvy vést k lomu jinak houževnatého materiálu uvnitř. Trhliny tvořící se v křehké povrchové vrstvě rostou vysokou rychlostí do houževnatého materiálu. Týká se to i vrstev nitridů u ocele a křehkého barviva na plastech. Stejně účinky nastanou i při degradaci povrchu [5].

Další hlediska nukleace trhlín

Ideální nebo teoretické kohezivní pevnost materiálu je vztažena k napětí nutnému k přerušení meziatomových vazeb a je odhadována na asi $0,1 E$, kde E je Youngův modul. Ideální pevnosti dokonalého materiálu bez vad se přibližuje pevnost vláken monokrystalů. Ve většině materiálů je pevnost v rozmezí $0,01$ až $0,0001 E$. Rozdíl skutečné a teoretické pevnosti způsobuje přítomnost vad, které podporují tvárnost a předčasný lom [5].

Výše popsané děje (podle obrázku *obr. 2.1.3-2*), mechanismy zapříčiňující nukleaci trhlín, jsou platné a nejsou v rozporu s experimentálně zjištěnými skutečnostmi. Nicméně je nutno dodat, že v některých materiálech, jako jsou silikátová skla, nelze původ trhliny, a tím i přítomnost nízké pevnosti, vysvětlit deformačními procesy tohoto druhu [5].

2.1.4 Tranzitní lomové chování

Praxe a experimenty dokázaly, že za určitých podmínek zatěžování se ocelové díly ze stejného materiálu poruší tvárným lomem a za jiných podmínek lomem štěpným. Podmínky zatěžování ovlivňující toto chování jsou provozní teplota, rychlost zatěžování a přítomnost vrubů.

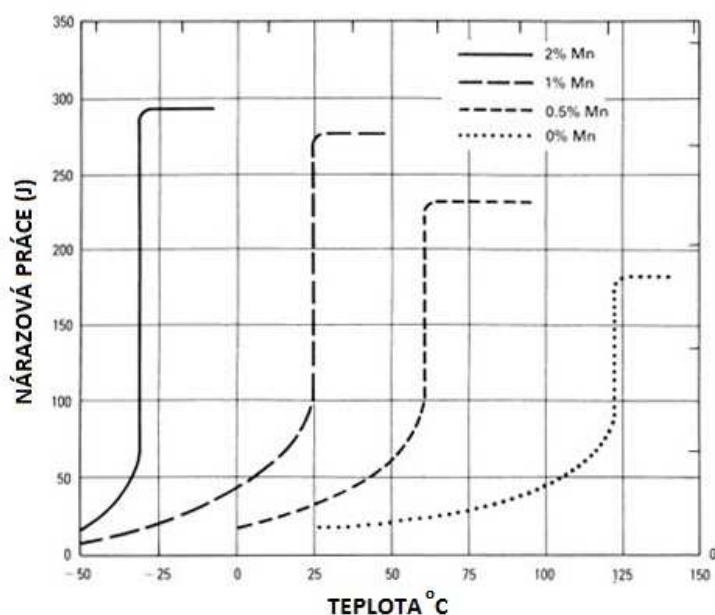
Tranzitní lomové chování popisuje změnu charakteru lomu materiálu z tvárného na štěpný (některé zdroje uvádějí „z houževnatého na křehký“) lom vlivem poklesu teploty. Studium tranzitního lomového chování se nezabývá iniciací lomu jako u lomové mechaniky, ale hlavní myšlenkou tohoto myšlenkového směru je zastavení růstu trhliny s ohledem na tranzitní teplotu [8, 9].

Rozdělení lomů je věnována následující kapitola, ale protože se zde často objevuje pojem tvárný a štěpný lom, je nutné tyto pojmy krátce definovat [1, 7, 8]:

- **Lomy tvárné** – K usmýknutí dochází skluzovým mechanismem, působením smykového napětí. Tomuto lomu vždy předchází výrazná plastická deformace. Existují i nízkoenergetické tvárné lomy, ale většinou je tvárný lom více energeticky náročný než lom štěpný.
- **Lomy štěpné** – Nejlépe se dá mechanismus popsat jako odtržení v určité krystalografické rovině, převládá působení normálového napětí. Štěpnému lomu nepředchází významná plastická deformace. Energeticky je většinou méně náročný než lom tvárný.

Tranzitní křivka

Tranzitní křivka vyjadřuje množství energie nutné pro přeražení tělesa v závislosti na provozní teplotě. Nejvhodnějším způsobem pro měření nárazové práce je léty osvědčená zkouška rázem v ohybu (*Charpyho kladivo*), kdy je relativně velkou rychlostí přeráženo těleso s vrubem. Pokud tedy budeme Charpyho zkoušku provádět za měnící se teploty získáme tranzitní křivky, například jako je tomu na obrázku 2.1.4-1 [8, 9, 11].



Obr. 2.1.4-1: Tranzitní křivky pro uhlíkovou ocel s měnícím se obsahem manganu [10].

Na obrázku 2.1.4-1 jsou tranzitní křivky pro čtyři uhlíkové ocele s různým obsahem manganu. Je patrné, že tvar i poloha křivek výrazně závisí na chemickém složení. S klesající teplotou se po křivce mění tvárný lom na štěpný:

- **Tvárné porušení** – výrazná deformace zkušebního vzorku je v takzvané oblasti horních prahových hodnot, kde absorbovaná energie na teplotě téměř nezávisí. V této oblasti dochází k tvárnímu porušení.
- **Štěpné porušení** – při poklesu nárazové práce se mění charakteristický vzhled i rozsah plastické deformace v blízkosti lomových ploch. Tvárný lom tedy přechází ve štěpný.

Toto chování se netýká jen těles s vrubem, ale i hladkých těles. Pro sestavení tranzitní křivky lze použít řadu zkoušek, včetně zkoušky tahem [9, 11].

2.2 Klasifikace lomů

Povrch lomu je tvořen soustavou elementárních ploch, kterým se ve fraktografii říká fazety. Podstata fraktografického šetření je založena na tom, že každý typ mechanismu lomu po sobě zanechává svou vlastní morfologii lomové plochy, podle které se dají lomy klasifikovat. Odlišných pohledů na lomové plochy je velice mnoho a níže uvedená hlediska reprezentují základní rozdělení lomů.

2.2.1 Lomy statické a únavové

Dílece namáhaných konstrukcí jsou zatěžovány různým způsobem a podle konkrétního způsobu pak dochází k různému lomu [12].

Statický lom

Lomu tohoto typu dosáhneme překročením meze pevnosti. Morfologie lomových ploch zde bývá velice rozmanitá a odpovídá způsobu namáhání a pochopitelně taky typu namáhaného materiálu [12].

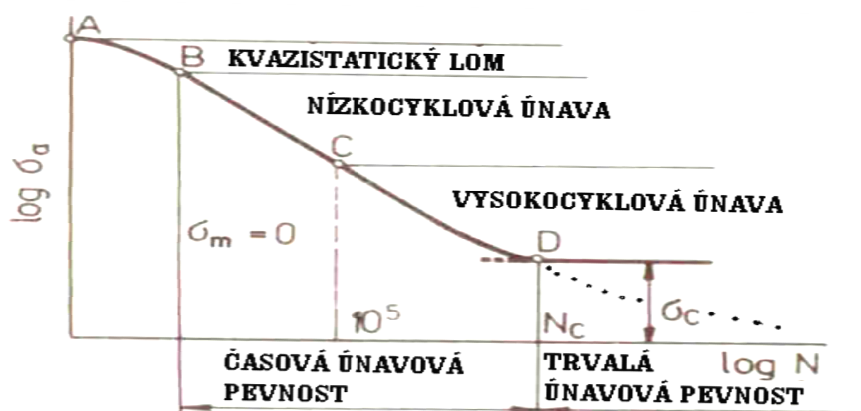
Obr. 2.2.1-1: Statický lom ozubeného kola [12].



Únavový lom

Únavový lom, jak napovídá název, je způsoben únavou materiálu, což je proces změny vlastností a stavu materiálu vyvolaný cyklickým zatěžováním. Únavový proces má kumulativní charakter. Podle počtu cyklů se únava součásti bez trhliny rozděluje na vysokocyklovou a nízkocyklovou, přesnou mezní hodnotu cyklů hodnotí různí autoři odlišně [8]:

- Vysokocyklová únava (měkké zatěžování – počet cyklů do lomu $> 10^4$, napětí pod mezí kluzu) Wöhlerova křivka, závislost na napětí
- Nízkocyklová únava (tvrdé zutěžování – počet cyklů do lomu $< 10^4$, napětí nad mezí kluzu) Mansonova-Coffinova křivka, závislost na deformaci

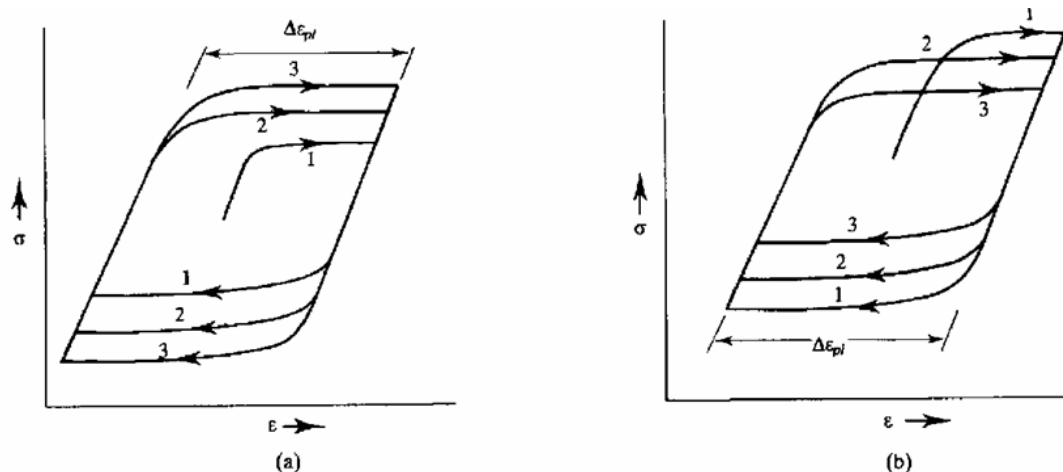


Obr. 2.2.1-2: Křivka únavového života [8].

Pokud jde o chování součásti s již existující trhlinou při cyklickém namáhání, tak její únavová životnost je dána rychlostí šíření trhliny. Podle druhu změn, způsobených cyklickou plastickou deformací, můžeme únavový proces rozdělit na tři stádia [8]:

1. Stádium změn mechanických vlastností

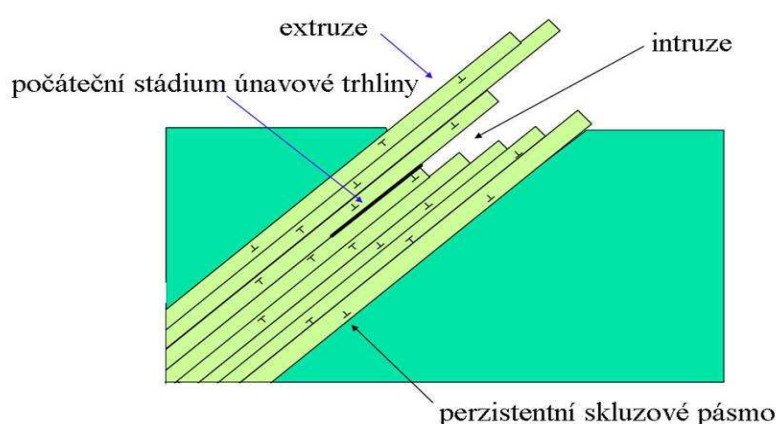
Ke změně mechanických vlastností dochází vlivem změny mikrostruktury, zejména stavem mřížkových poruch. Dochází buďto k cyklickému zpevnění, nebo cyklickému změkčení. Tyto změny mechanických vlastností materiálu reprezentuje například hysterezní smyčka.



Obr. 2.2.1-3: Hysterezní smyčka, a) materiál cyklicky zpevňuje, b) materiál cyklicky změkčuje [8].

2. Stádium vzniku únavových trhlin

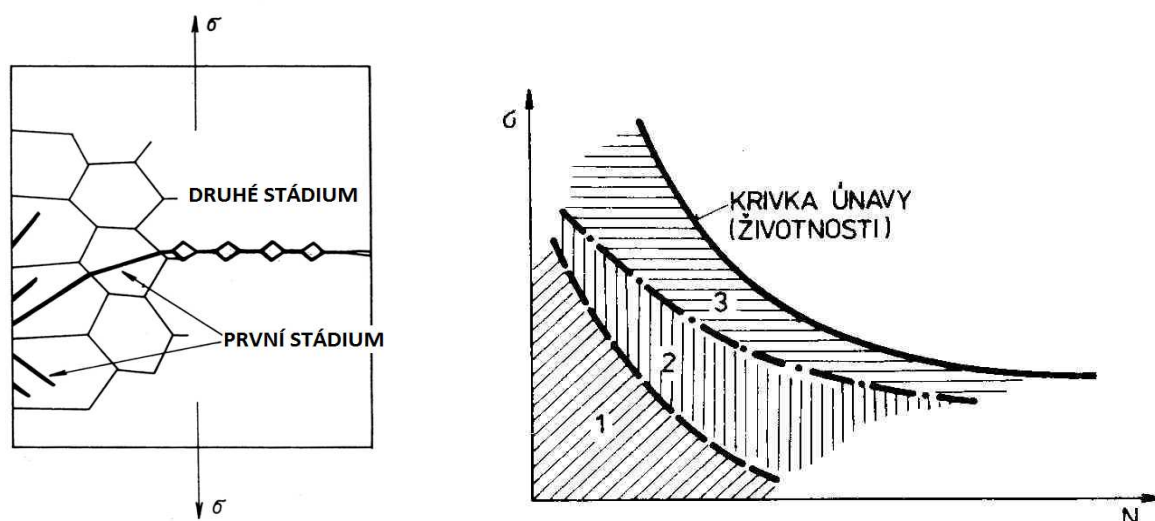
Únavové trhliny se iniciují hlavně na povrchu, respektive pokud materiál obsahuje vměstky, dutiny nebo jiné vady, tak se trhliny nukleují právě tam. Mechanismus nukleace mikrotrhlin není zcela objasněn a v podání různých autorů není jednotný. Avšak všechny teorie se shodují na tom, že nukleaci předchází cyklické plastické deformace a vznik takzvaných perzistentních skluzových pásem.



Obr. 2.2.1-4: Perzistentní skluzové pásmo [8].

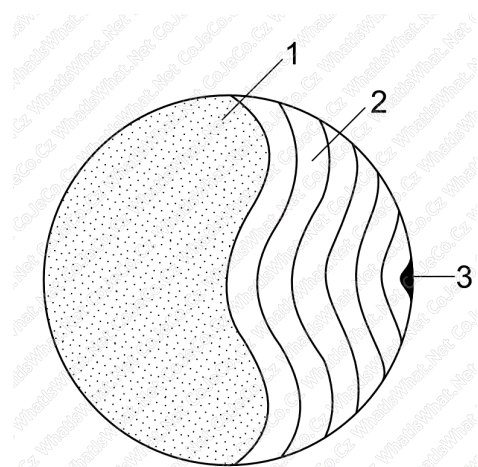
3. Stádium šíření únavových trhlin

Růst vzniklých únavových trhlin vlivem nerovnoměrného rozložení napětí a deformace vyústí ve vznik takzvané magistrální trhliny. Tato trhlina vzniká z některých mikrotrhlin nukleovaných v předchozím stádiu a šíří se podstatnou částí součásti, zatímco růst ostatních trhlin je potlačen. Stádium 3 končí únavovým lomem.



Obr. 2.2.1-5: Šíření trhliny, stádía únavového života [8].

Makroskopicky je na povrchu lomu možno rozlišit tři typické oblasti viditelné na obrázku 2.2.1-6. Po určitém počtu cyklů vznikají místa s koncentrací napětí, jež se stávají zárodky trhlin (iniciace). Následné dynamické namáhání pak zapříčiní další růst trhliny do materiálu opakovaným otevíráním a zavíráním trhliny (šíření únavové trhliny). Takovýto sled dějů pak v lomové ploše materiálu zanechá typický znak, vyhlazený povrch s postupovými čarami. Následující rozšíření trhliny pak vede ke zmenšení nosného průřezu a překročení meze pevnosti způsobující statické dolomení (dolomení). Je nutné dodat, že přítomnost těchto oblastí je sice typickým znakem únavových lomů, ale nikoliv podmiňujícím [1].



Obr. 2.2.1-6: Schéma částí únavového lomu.
1- dolomení, 2- šíření únavové trhliny, 3-iniciace [13].



Obr. 2.2.1-7: Únavový lom poloosy [12].

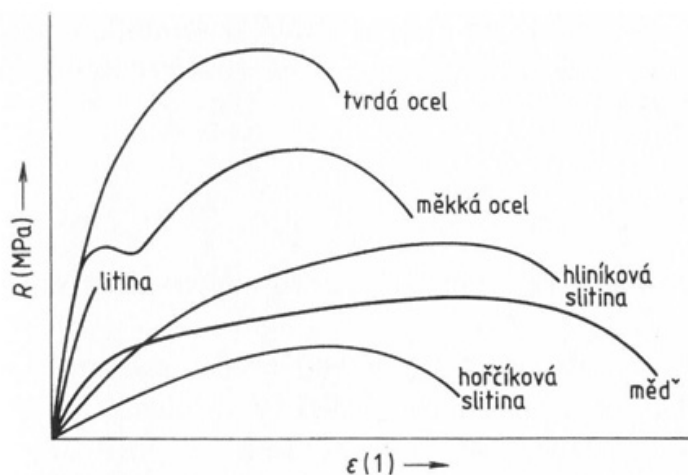


Z hlediska mikromorfologie povrchu lomu se při únavovém porušení objevují takzvané striace. Vznikají cyklickou plastickou deformací porušovaného materiálu. Tento znak se objevuje téměř u každého únavového lomu, výjimku tvoří například laboratorně zkoušené materiály ve vakuu. Z hlediska průběhu lomu vzhledem k hranicím zrn se jedná téměř výlučně lom transkrystalický [1].

Obr. 2.2.1-8: Striace na povrchu únavového lomu, TEM [1].

2.2.2 Lomy křehké a houževnaté

V makroskopickém měřítku je pro takovéto dělení hlediskem rozlišování míra plastické deformace v okolí lomu. Dalším hlediskem pro tento druh klasifikace je míra energie spotřebovaná porušením, která s velikostí plastické deformace souvisí. Z tahového diagramu na obrázku 2.2.2-1 je jasné, že porušení plastických materiálů vyžaduje více energie než porušení materiálů křehkých, protože energie spotřebovaná při deformaci materiálu je úměrná ploše pod tahovou křivkou (například kontrast mezi mědí a litinou).

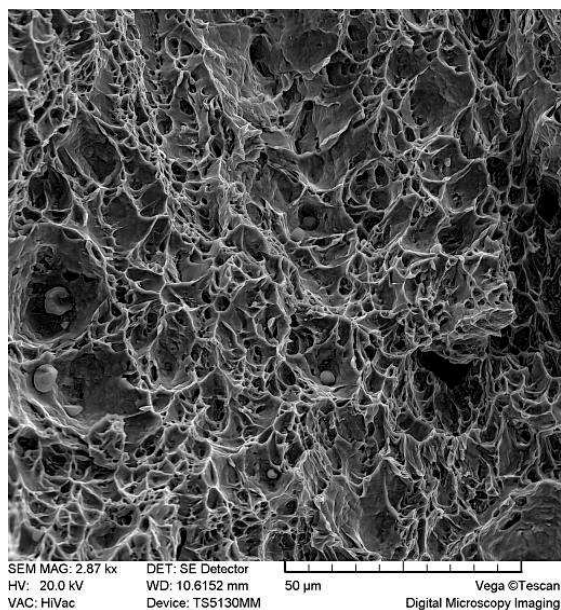


Druh lomu podle tohoto kritéria je silně ovlivněn typem materiálu. Nejvíce rozhodující materiálová charakteristika je typ krystalické mřížky. V druhé řadě je typ lomu ovlivněn podmínkami, jako je teplota, rychlost zatěžování a vlivy napjatosti (například vruby) [1].

Obr. 2.2.2-1: Tahový diagram [14].

Houževnaté lomy

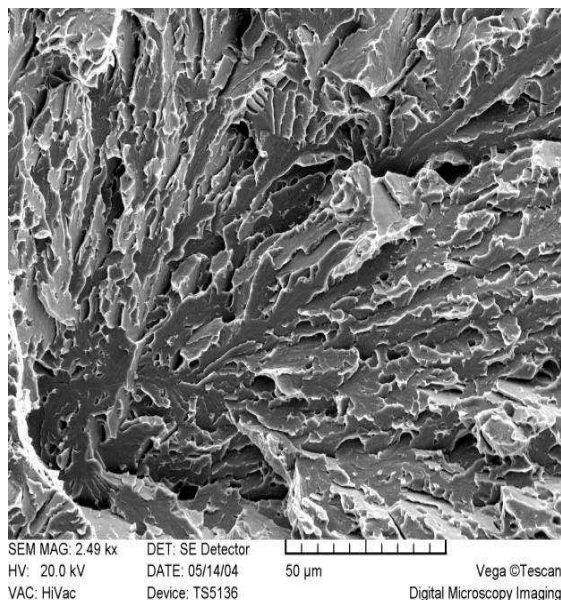
S houževnatými lomy se často setkáváme u tvárných materiálů. Charakteristická je rozsáhlá makroplastická deformace doprovázející tento druh lomu. Houževnaté lomy vznikají přednostně mechanismem tvárného porušení. Typický povrch tohoto lomu je matný, někdy vláknitý [1].



Obr. 2.2.2-2: Houževnatý lom vzniklý tvárným porušením [15, 16].

Křehké lomy

Křehkému lomu nepředchází významná plastická deformace. Tyto lomy nastávají většinou u křehkých materiálů. Křehké lomy vznikají mechanismem transkrystalického štěpení, interkrystalického oddělování nebo dekohezí hraničních oblastí. Jsou typické pro sklo, keramiku, avšak mohou nastat i u některých kovů, relativně houževnatých, např. za nízkých teplot. Pro šíření křehkého lomu je obvykle vyžadováno málo energie, tudíž probíhá tento lom rychle [1].



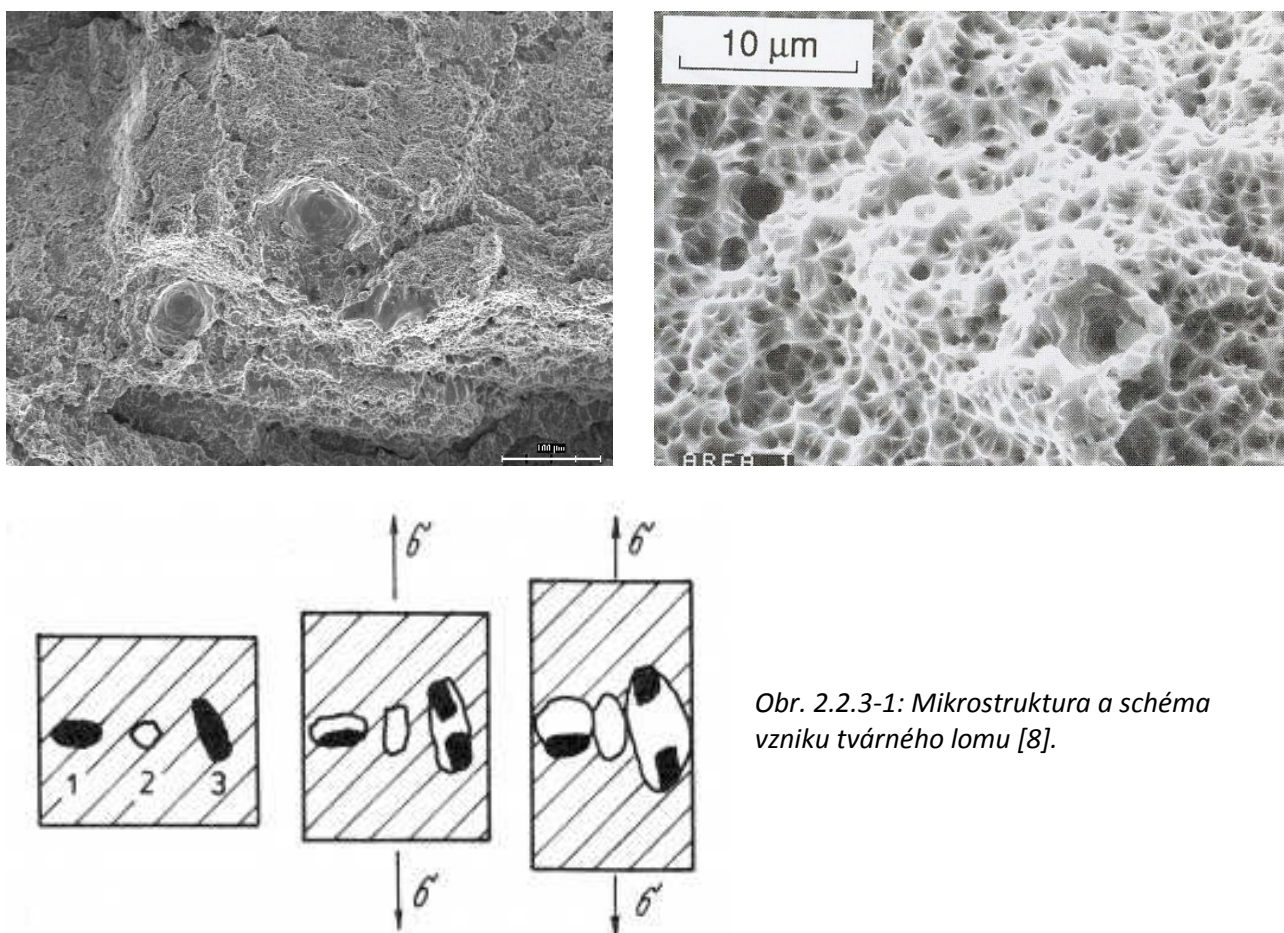
Obr. 2.2.2-3: Křehký lom ocele [15, 16].

2.2.3. Lomy tvárné a štěpné

Podle mechanismu vzniku lomové plochy a s ním spjatým vzhledem lomových ploch lze lomy klasifikovat na tvárné a štěpné. Toto dělení vzniklo až za podpory elektronové mikroskopie a zabývá se tedy mikromechanismy porušení.

Lomy tvárné

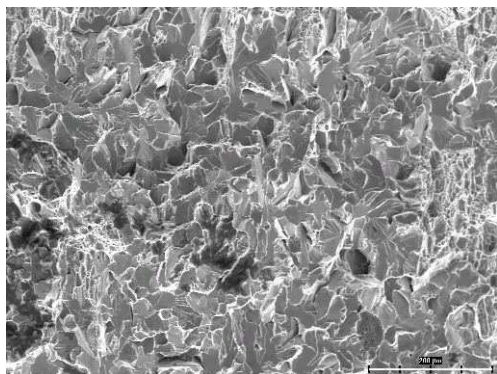
Tvárný lom nastává mechanismem koalescence mikro dutin, který na lomové ploše zanechává typické jamky, které jsou vidět na obr. 2.2.3-1. Z mikroskopického hlediska probíhá lom zejména transkrystalicky, ale jsou známy i případy interkrystalické vlivem defektů či sekundárních fází na hranicích zrn. Z makroskopického hlediska mívá tento lom matnou strukturu. Tomuto lomu vždy předchází výrazná plastická deformace [1, 7, 8].



Obr. 2.2.3-1: Mikrostruktura a schéma vzniku tvárného lomu [8].

Lomy štěpné

Nejlépe se dá mechanismus popsat jako odtržení v určité krystalografické rovině, převládá působení normálového napětí. Mezi typické mikrofraktografické znaky patří štěpné fazety, dále se mohou objevit jazýčky, nebo říčková kresba. Ke štěpnému porušení dochází jak transkrystalicky tak interkrystalicky. U křehkého štěpného lomu je v makroskopickém měřítku povrch lomu obvykle typicky lesklý, krystalický. Štěpnému lomu nepředchází významná plastická deformace [1, 7, 8].



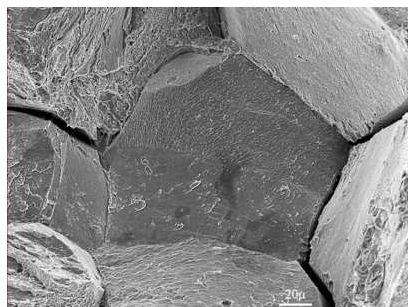
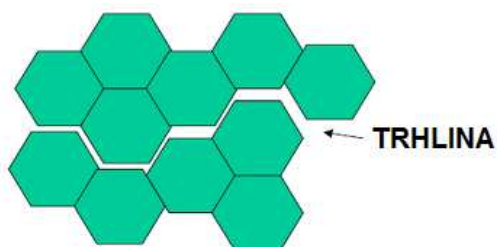
Obr. 2.2.3-2: Štěpný lom [8].

2.2.4 Lomy interkrystalické a transkrystalické

U polykrystalických materiálů nám charakter průběhu lomu vzhledem k hranicím zrn dělí lomy na interkrystalické a transkrystalické [8].

Lomy interkrystalické

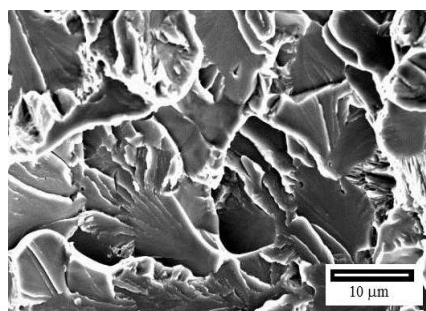
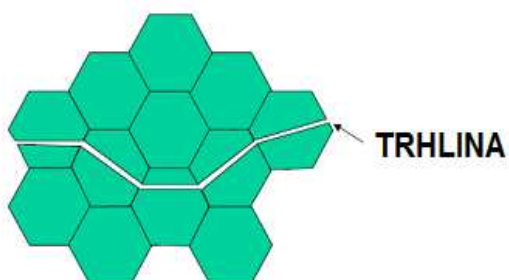
Tento lom, který bývá velice málo četný, prochází mezi zrna. Povrch lomu má charakteristickou morfologii obnažených hranic zrn.



Obr. 2.2.4-1: Interkrystalický lom, vlevo schéma, vpravo snímek ze SEM [8].

Lomy transkrystalické

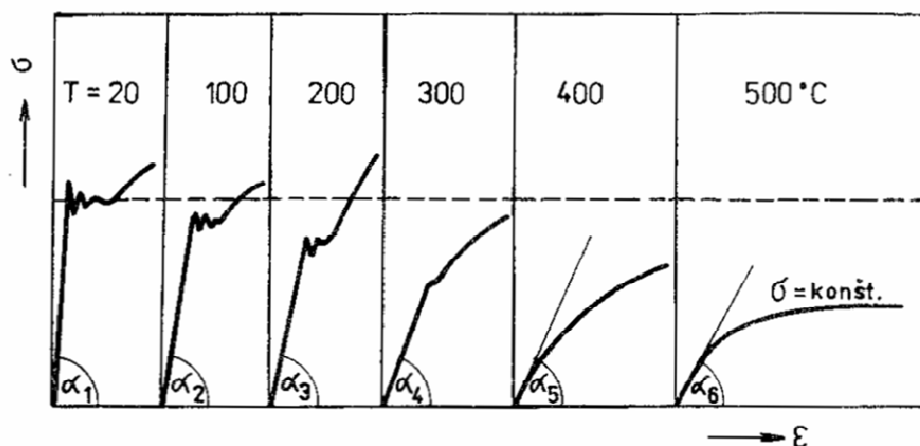
Tento lom prochází přes zrna. Houževnatý a křehký transkrystalický lom vypadá naprosto odlišně, tudíž nelze tvrdit, že by transkrystalický lom měl typickou morfologii.



Obr. 2.2.4-2: Transkrystalický lom, vlevo schéma, vpravo snímek ze SEM [8].

2.2.5 Lomy při tečení (lomy při creepu)

Creep je pomalá plastická spojitá deformace materiálu vlivem působení teploty a času a creepové lomy vznikají ve finální fázi tohoto procesu tečení. Na obrázku 2.2.5-1 je vidět jak se vzrůstající teplotou mizí mez kluzu a celkově se mění tahový diagram s tendencí k větším deformacím při nižších teplotách.



Obr. 2.2.5-1: Vliv teploty na tahový diagram nízkouhlíkové oceli [8].

Zapsáno matematicky je tedy creepová deformace funkcí napětí, času a teploty:

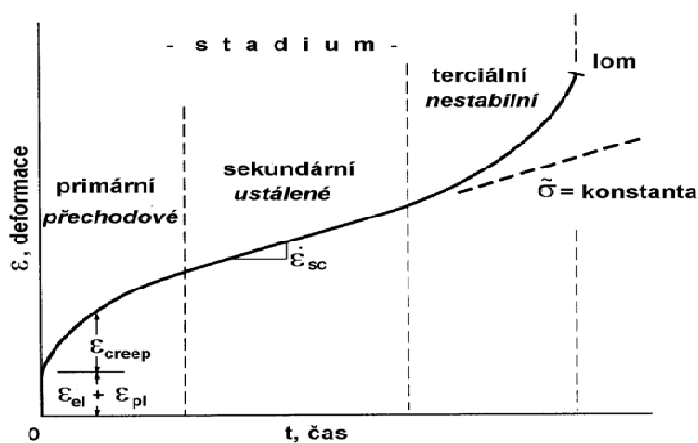
$$\varepsilon = f(\sigma, t, T)$$

Deformace za normální teploty nezávisí na čase:

$$\varepsilon = f(\sigma)$$

Chování materiálu při tečení je patrné z creepové zkoušky, jejíž průběh je na obrázku 2.2.5-2. Hodnota $\dot{\varepsilon}$ reprezentuje rychlost deformace, je daná derivací křivky ε - t . Jsou zde zakresleny 4 charakteristické úseky [7, 8]:

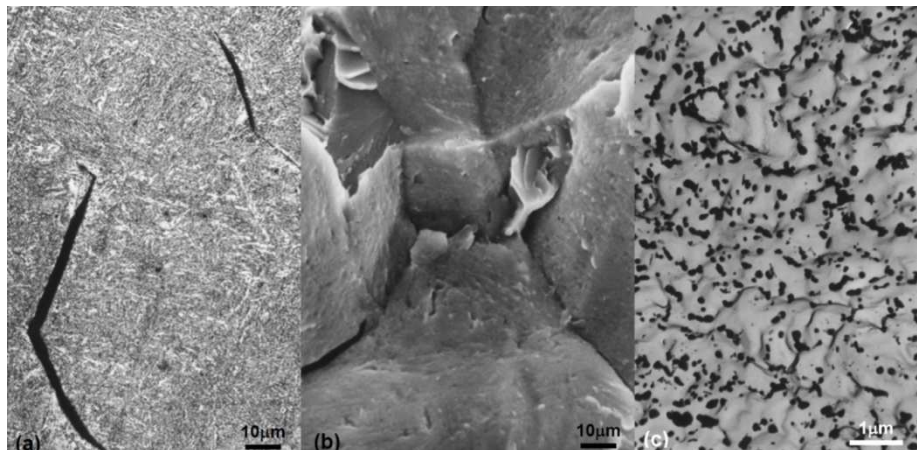
- 1) Okamžitá deformace vzorku – prodloužení vlivem aplikovaného napětí
- 2) Primární (přechodové) stadium – rychlost deformace je poměrně vysoká, ale klesá a na konci primárního stadia se stává konstantní
- 3) Sekundární (ustálené) stadium – konstantní rychlost deformace po celou dobu tohoto stadia
- 4) Terciální (nestabilní) stadium – vzrůstající rychlost deformace zakončená lomem



Obr. 2.2.5-2: Křivka tečení [8].

Tečení při zvýšených teplotách je doprovázeno těmito strukturními změnami [7]:

- 1) Krystalografický skluz (pohyb dislokací v kluzných rovinách)
- 2) Tvorba substrukтуры (pohyb dislokací mimo kluzné roviny)
- 3) Tečení po hranicích zrn
- 4) Difúze vakancí a intersticiálních atomů



Obr. 2.2.5-3 Creepové lomy v tepelně ovlivněné zóně svarového spoje nízkolegované oceli [1].

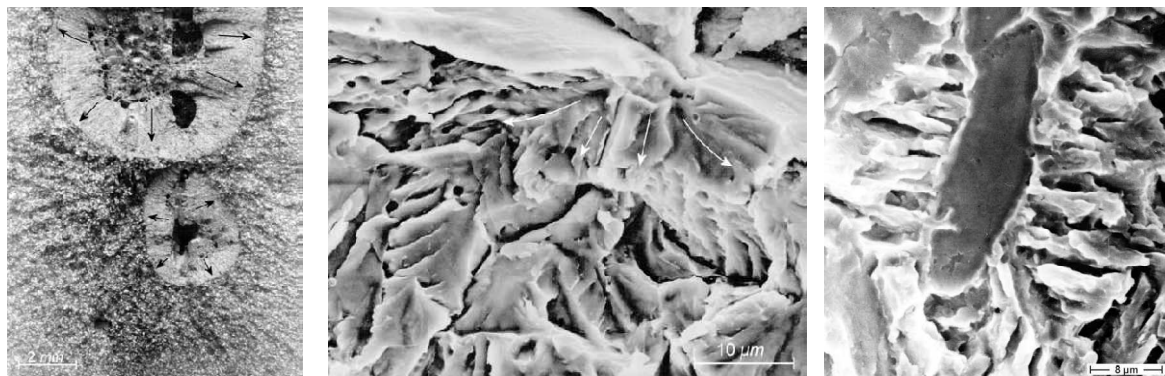
2.2.6 Lomy vyvolané působením prostředí

Tato porušení jsou nebezpečná hlavně díky tomu, že k nim dochází bez výraznějšího poškození povrchu materiálu, často bez ohledu na jejich vysokou pevnost. Degradační mechanismy způsobující náhlé selhání kovových materiálů se zhruba rozdělují [17]:

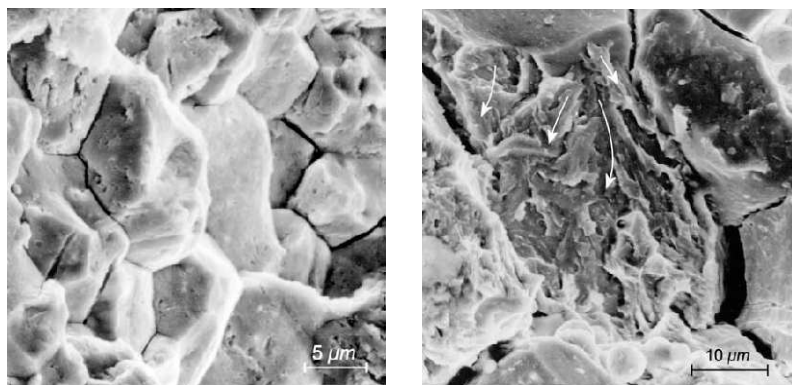
- vodíková křehkost
- korozní praskání

Vodíková křehkost

Vodík jako nejlehčí prvek lehce vstupuje do oceli v atomární formě. Rekombinací na určitých místech pak způsobuje ztrátu plasticity nebo přímo tvoří dutiny a trhliny. Takováto ztráta pevnosti kovových materiálů se nazývá vodíkovou křehkostí. K samotnému vodíkovému praskání pak dochází jak transkrystalicky tak i interkrystalicky. Jedním z hlavních morfologických znaků jsou „rybí oka“, která se často objevují ve svařencích [17].



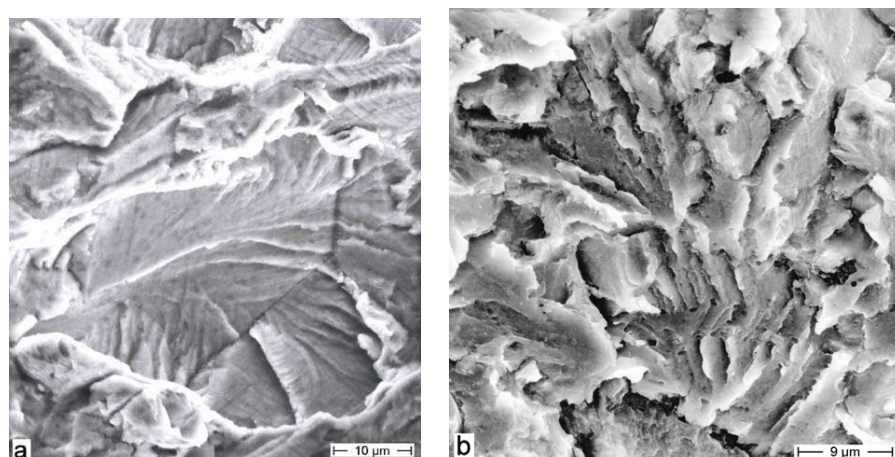
Obr. 2.2.6-1: Rybí oka [17].



Obr. 2.2.6-2: Interkrystalické porušení vlivem vodíkového praskání [17].

Korozní praskání

Korozní praskání vzniká působením prostředí někdy i v kombinaci s provozním namáháním. Pokud dochází ke spolupůsobení cyklického namáhání, je důsledkem speciální případ tzv. korozní únava. Mechanismus korozního praskání je vyvolán aktivním rozpouštěním na čele trhliny, která působí jako koncentrátor napětí. Šíření trhliny probíhá transkrystalicky nebo interkrystalicky. Má typickou mikromorfologii velice podobnou vodíkovému praskání [17].



Obr. 2.2.6-3: Korozní praskání v Cr-Ni oceli [17].

2.3 Metody studia lomových ploch

Studium lomových ploch, stejně jako klasické metalografické šetření, se provádí makroskopicky nebo mikroskopicky. Děje se tak za použití světelných nebo elektronových mikroskopů.

2.3.1 Světelná mikroskopie

Základním předpokladem pro studium lomových ploch světelnou mikroskopií je vlastnictví světelného mikroskopu. Světelný mikroskop se skládá z mechanických částí, osvětlovacích částí a také z nejdůležitějších optických částí. Základem světelného mikroskopu je právě optická část, popíšeme si ji tedy podrobně.

Skládá se ze dvou soustav čoček, které mají společnou optickou osu. Jedná se o objektiv a okulár. Část mikroskopu, která je nazývána objektiv, má malou ohniskovou vzdálenost (řádově v

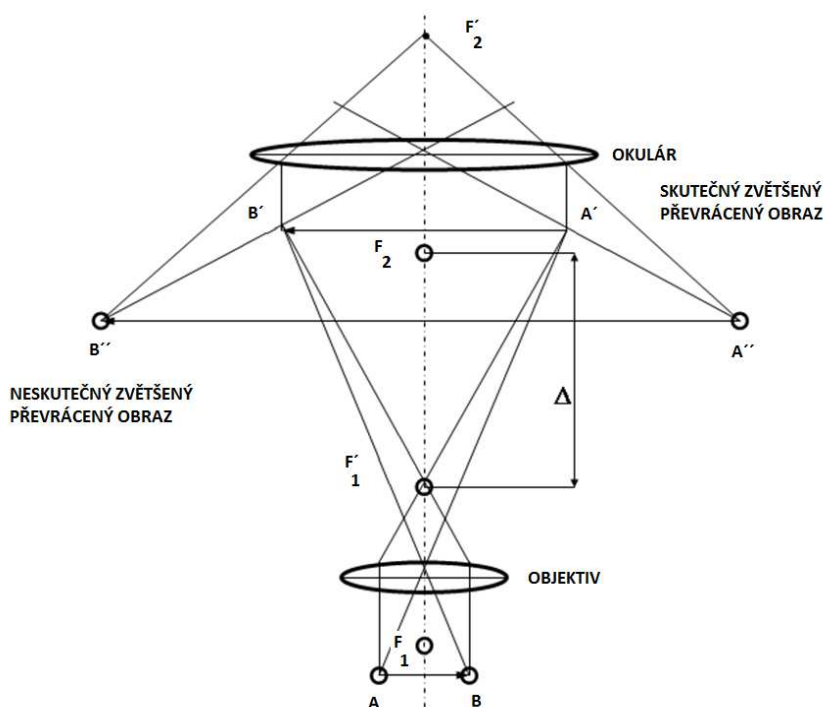
milimetrech). Pozorovaný předmět se umísťuje blízko před předmětové ohnisko, takže vzniká skutečný, zvětšený a převrácený obraz. Tento obraz vzniká mezi druhou částí mikroskopu, tzv. okulárem a jeho předmětovým ohniskem¹. Vzniklý obraz pak pozorujeme okulárem podobně jako lupou, čímž získáváme další zvětšení. Ohnisková vzdálenost okuláru se pohybuje v řádech centimetrů. Obrazové ohnisko objektivu a předmětové ohnisko okuláru nesplývají, ale jsou od sebe vzdáleny o hodnotu optického intervalu, jehož hodnota se u mikroskopu pohybuje mezi 15 cm a 20 [3, 18, 19].

2.3.1.1 Charakteristické hodnoty pro mikroskopii

Cílem pozorování je dosáhnout požadovaného zvětšení, rozlišovací schopnosti, hloubky ostrosti a kontrastu. Tyto faktory je tedy nutné stručně definovat:

Zvětšení

Na obrázku 2.3.1.1-1 je schéma světelného mikroskopu. Pozorovaný předmět AB se nachází před ohniskem objektivu. Paprsky světla, které objektivem projdou, vytváří skutečný, převrácený, zvětšený obraz předmětu A'B'. Tento obraz je zvětšen okulárem a vytváří se neskutečný, zvětšený a přímý obraz A''B''. Pro zvětšení objektivu Z_1 a zvětšení okuláru Z_2 platí [20]:



$$\frac{A'B'}{AB} = Z_1$$

$$\frac{A''B''}{A'B'} = Z_2$$

, rovnice (3, 4)

Celkové zvětšení mikroskopu je dáno součinem zvětšení okuláru a objektivu:

$$\frac{A''B''}{AB} = Z_1 \cdot Z_2$$

, rovnice (5)

Obr. 2.3.1.1-1: Schéma světelného mikroskopu [19].

Zvětšení mikroskopu se vyjadřuje rovněž v závislosti na ohniskových vzdálenostech okuláru a objektivu:

$$Z = \frac{\Delta_o}{f_{ob}} \cdot \frac{d}{f_{ok}}, \text{ rovnice (6)}$$

Z – je celkové zvětšení mikroskopu (1)

f_{ob} – ohnisková vzdálenost objektivu (m)

f_{ok} – ohnisková vzdálenost okuláru (m)

Δ_o – optická délka tubusu mikroskopu (m)

d – konvenční hodnota zrakové vzdálenosti (m)

Rozlišovací schopnost

Rozlišovací schopnost je dána minimální vzdáleností dvou ještě rozlišitelných bodů. Každý objektiv světelného mikroskopu má vyznačenou hodnotu takzvané aperatury A . Aperatura je definována [19]:

$$A = n \cdot \sin \alpha, \text{ rovnice (7)}$$

α – je poloviční úhel vstupu odraženého světla do objektivu (rad)

n – je index lomu (1)

Minimální vzdáleností dvou ještě rozlišitelných bodů d_{\min} je pro použití světelného mikroskopu definována [19]:

$$d_{\min} = \frac{\lambda}{A} \text{ rovnice (8)}$$

λ – vlnová délka (m)

Z tohoto vztahu je jasné, proč elektronové mikroskopy disponují oproti světelným lepší rozlišovací schopností. Svazek urychlených elektronů má totiž podstatně kratší vlnovou délku.

Hloubka ostrosti

Vyjadřuje rozdíl vzdálenosti nejbližšího a nejvzdálenějšího předmětu, které se ještě lidskému oku jeví jako ostré. Hloubka ostrosti H závisí na minimální vzdálenosti dvou ještě rozlišitelných bodů d_{\min} a na vstupním úhlu α objektivu [3]:

$$H = \frac{d_{\min}}{\operatorname{tg} \alpha}, \text{ rovnice (9)}$$

Maximální hloubka ostrosti u světelných mikroskopů je $0,2 \mu\text{m}$ [21].

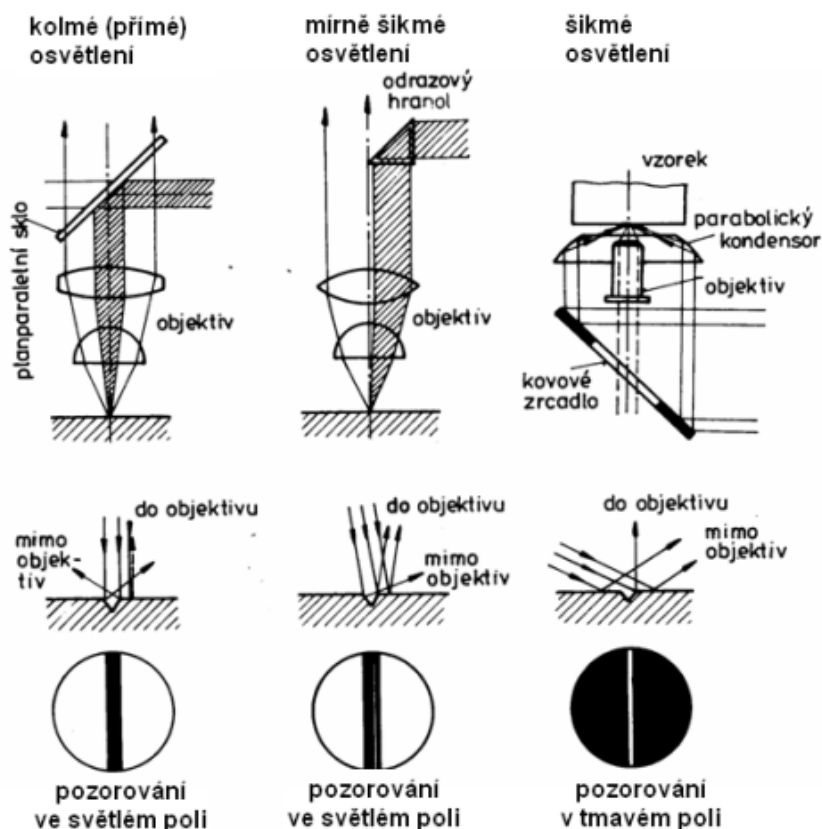
Kontrast

Termín kontrast je chápán jako subjektivně vizuálně hodnocená nestejnost vzhledu dvou částí zorného pole viděných současně. Obecně se kontrast může týkat jasu, barvy atd. V optické fraktografii se vysoký kontrast požaduje u zobrazení pozorovaných strukturních částí lomu. K dosažení vysokého kontrastu jsou vypracovány jednak metody osvětlení vzorku a také metody úpravy povrchu vzorku [22]:

A) Optické metody

1) Světlé a tmavé pole

Základní uspořádání pro tuto optickou metodu jsou 3: Kolmé osvětlení, šikmé osvětlení přes objektiv nebo pozorování v tmavém poli. Jednotlivá uspořádání pak rovné a šikmé plochy zobrazují jako světlá a tmavá pole. Princip je patrný z obrázku 2.3.1.1-2 [19].



Obr. 2.3.1.1-2: Osvětlení metalografických vzorků [19].

2) Polarizované světlo

Polarizované světlo se dá získat různými metodami. Ve světelné mikroskopii se to uskuteční dvojlomem pomocí Nicolova hranolu². Při pozorování pomocí polarizovaného světla dochází ke zvýšení kontrastu jednotlivých zrn. Používá se pro ohledání materiálů s monofázovou strukturou.

3) Fázový kontrast

Převádí fázové posuvy světelného vlnění, které prošlo vzorkem, na změny intenzity v obraze [23].

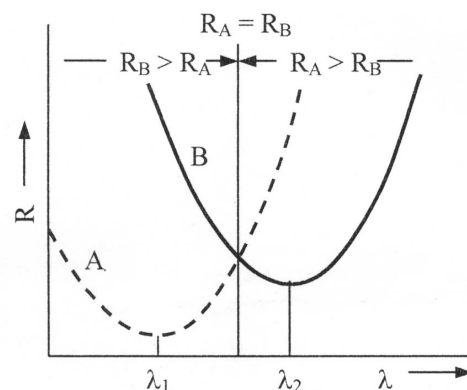
4) Interferenční mikroskopie

Metody interferenčního kontrastu jsou založené na rozkladu světelného paprsku na dva nebo více paprsků, které se po průchodu rozdílných optických drah znovu spojují a vzájemně interferují. Při interferenci vzniká i barevný kontrast [19].

B) Úpravou povrchu vzorku

1) Napaření interferenční vrstvy

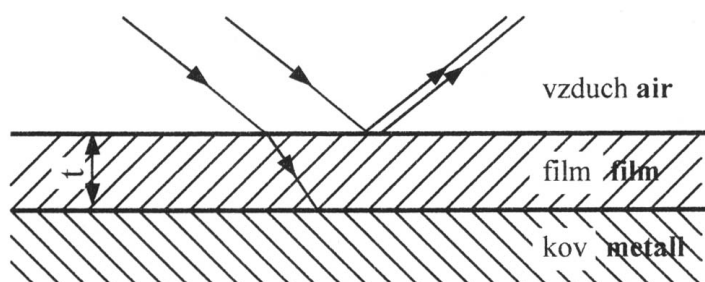
Význam napařených interferenčních vrstev je ve zvýraznění odlišné odrazivosti R světla na jednotlivých fázích. Odlišné fáze mají odlišné spektrum odraženého světla s jinou vlnovou délkou (λ_1 a λ_2). Pokud $\lambda_1 \neq \lambda_2$, mají fáze v odraženém světle odlišnou barvu, která je podstatou odlišení těchto fází při metalografickém rozboru [19].



Obr. 2.3.1.1-3: Odlišná odrazivost R [19].

2) Barevné leptání

Reakcí povrchu metalografického výbrusu a barevného leptadla vzniká transparentní film, který má funkci interferenčního povlaku. Pokud je totiž pozorovaný vzorek pokryt transparentním filmem, vzniká interference světla v důsledku rozdělení odraženého světla na složky odražené na rozhraní vzduch - vrstva a na rozhraní kov - vrstva (Obr. 2.3.1.1-4) [19].



Obr. 2.3.1.1-4: Barevné leptání [19].

2.3.1.2 Příprava vzorku

Pro fraktografickou analýzu se většinou provádí jen dělení, protože se snažíme zachovat co nejvíce z morfologie lomových ploch. Při metalografickém šetření je většinou nutné provést všechny níže popsané procesy.

Odběr vzorku

Hlavní zásadou při procesu odběru vzorku od zbytku součásti je, že se nesmí změnit strukturu. Hrozí nebezpečí jednak tepelného ovlivnění a také je tu hrozba deformačního ovlivnění struktury. Vzorky odebíráme vždy takové velikosti a z takových míst, abychom vystihly celkovou strukturu materiálu. Při fraktografickém šetření se zaměříme na oblast vzniku a rozvoje trhlin a jejich okolí. Dále je třeba respektovat různé technologické faktory výroby součásti.

Nejčastější metodou pro odebrání vzorku je rozbrušování pod chladicí kapalinou. Méně často se používá frézování, lámání či dělení pomocí elektrojiskrových řezaček. Po samotném odběru se nesmí zapomenout na jasné a jednoznačné označení.

Jak bylo zmíněno výše, tak při fraktografickém šetření se zpravidla žádná další operace s vzorkem nedoporučuje, protože se nutné zachovat co nejvíce z původní morfologie lomových ploch. Avšak při klasickém metalografickém šetření je nutné provést následující procesy, viz Obr. 2.3.1.2-1.



Obr. 2.3.1.2-1: Příprava metalografického vzorku [24].

Broušení

Brousíme pro dosažení rovnoměrné drsnosti. Brousí se postupně od hrubého po jemnější brusné papíry. Jednotlivé fáze broušení zanechávají na povrchu vzorku rýhy, které odstraňujeme otáčením o 90° [25].

Leštění

Leštěním odstraňujeme rýhy po posledním nejjemnějším broušení. Leštění se může provádět různými technologickými principy [25]:

- Mechanicky – za použití brusných past na leštícím plátně
- Elektroliticky – principem elektrolýzy
- Chemicky – také principem elektrolýzy, ale elektrickým zdrojem je zde rozdíl elektronegativit

Leptání

Tato operace se neaplikuje vždy. Pokud například pozorujeme nekovové fáze materiálu, tak vyvolání struktury není nutné. V ostatních případech se materiál leptá různými látkami a metodami podle druhu studovaného materiálu [25]:

- Chemické leptání – za vzniku chemických zplodin dojde k vytvoření reliéfu jednotlivých strukturních složek
- Elektrochemické leptání – zejména pro materiály odolné proti chemickému leptání
- Leptání na hranice zrn – zviditelnění hranic zrn na principu rozdílnosti volné energie atomů v místě styku jednotlivých hranic a na ploše krystalů
- Leptání plošné – rozlišení zrn pomocí vyleptání povrchu do tvaru stupínků

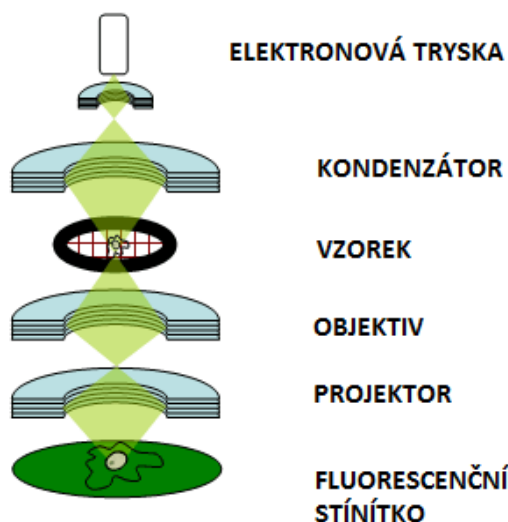
2.3.2 Elektronová mikroskopie

Elektronový mikroskop je optický přístroj, ve kterém jsou oproti světelnému mikroskopu fotony nahrazeny elektrony a skleněné čočky elektromagnetickými čočkami. Elektromagnetická čočka je v podstatě cívka, která vytváří vhodně tvarované magnetické pole. Jedním ze základních parametrů všech mikroskopů je jejich mezní rozlišovací schopnost. Protože mezní rozlišovací schopnost je úměrná vlnové délce použitého záření a elektrony mají podstatně kratší vlnovou délku než má viditelné světlo, má elektronový mikroskop mnohem vyšší rozlišovací schopnost a může tak dosáhnout mnohem vyššího efektivního zvětšení (až 1 000 000×) než světelný mikroskop. Navíc lze zkoumaný objekt chemicky analyzovat, protože při dopadu elektronů na vzorek, se uvolní elektromagnetické záření charakteristické pro atomy ve vzorku obsažené [3, 26].

Transmisní (prozařovací) elektronový mikroskop (TEM)

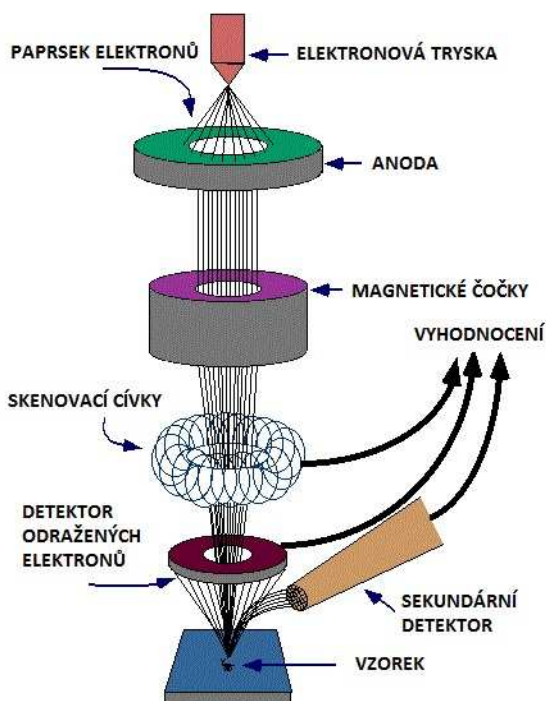
Dokáže zobrazit vnitřní strukturu vzorku pomocí prošlých elektronů, elektrony procházejí skrz vzorek a až pak jsou detekovány. Pracuje se tedy s tenkými vzorky a urychlovací napětí je oproti SEM dostatečně vysoké. Pomocí elektronové difrakce je také schopen určit symetrii krystalové mřížky.

Na obrázku 2.3.2-1 je schéma TEM. Zdrojem paprsku elektronů je elektronová tryska (elektronové dělo), která se skládá z katody, anody a Wehneltova válce, což je elektrostatická čočka, která stlačuje elektronový svazek do křížové těsně před anodou. Zobrazovací soustava je sestavena z objektivu a projektoru [3, 27].



Obr. 2.3.2-1: Transmisní (prozařovací) elektronový mikroskop [28].

Skenovací (rastrovací) elektronový mikroskop (SEM)



K zobrazování se využívá sekundárních elektronů a zpětně odražených elektronů. Oproti TEM má konstrukce SEM vychylovací skenovací cívký, aby mikroskop skenoval a registroval bod po bodu údaje z povrchu vzorku. Výhodou oproti TEM je jednoduchá příprava vzorků a snadná interpretace obrazu a velká hloubka ostrosti, což je při studiu lomových ploch jeden z nejdůležitějších faktorů [3, 27].

Obr. 2.3.2-2: Skenovací (rastrovací) elektronový mikroskop [29].

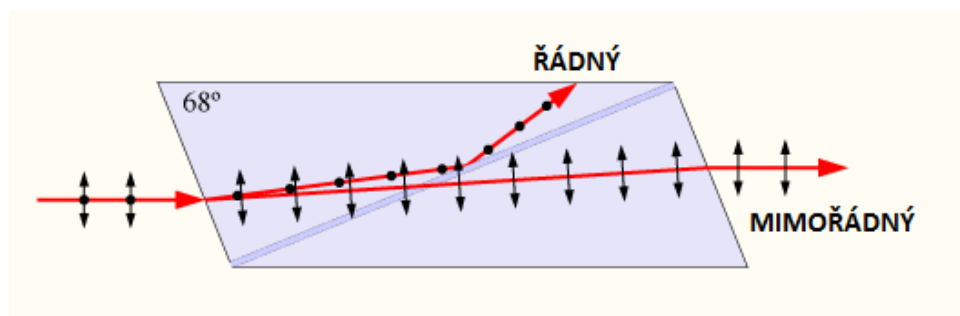
Poznámky ke kapitole 2.3:

1) Předmětové ohnisko

Pro daný optický systém existují dvě různé hodnoty ohniskové vzdálenosti, jedna pro prostor, kde se nachází předmět, tedy „před“ optickým systémem (tzv. **předmětové ohnisko**), druhá pro prostor, kde se vytváří obraz, tedy „za“ optickým systémem (tzv. **obrazové ohnisko**) [3].

2) Nicolův hranol

Je jednopaprskový polarizátor. Hranol je vytvořen ze dvou pravoúhlých hranolů, vybroušených z islandského vápence (s ostrými úhly 68° a 22°) a navzájem spojených kanadským balzámem (transparentní lepidlo). Dopadající paprsek se na rozhraní lomí a rozdělí se na řádný a mimořádný paprsek. Mezní úhel pro rozhraní vápenec - balzám pro řádný paprsek je přibližně 68° . Pro řádný paprsek nastává na rozhraní totální odraz, zatímco mimořádný paprsek prochází do druhé poloviny hranolu a z hranolu vystupuje ve směru rovnoběžném s dopadajícím paprskem, ale s mírným příčným posunem [3, 30].



Obr. 2.3-1:
Nicolův hranol [3].

2.4 Zkoušení odolnosti materiálu vůči křehkému porušení

Mikroskopická a makroskopická hlediska jsou úzce propojena. Lokální koncentrace napětí u defektů má pochopitelně vliv na celkovou pevnost součásti. Tento vztah je dobře demonstrován jednak v praxi u skutečné konstrukce, ale také je dobře pozorovatelný již ve fázi zkoušení. Únosnost materiálu tedy nezávisí tolik na mezi kluzu, jako právě na odolnosti proti iniciaci a šíření lomu.

Houževnatost je odolnost materiálu proti křehkému lomu. V technické praxi se setkáváme buď s lomovou houževnatostí, nebo vrubovou houževnatostí.

- **Vrubová houževnatost** K_C [$J \cdot m^{-2}$]

Vrubová houževnatost je práce potřebná k přeražení zkušební tyče opatřené vrubem vtažená na jeho průřez. Pro výpočet vrubové houževnatosti platí rovnice (příloha A43) [6].

$$K_I = Y \cdot \sigma \sqrt{\pi \cdot a}, \text{ rovnice (10)}$$

Y – koeficient tvaru a velikosti trhliny a geometrie vzorku (1)

σ – vztažené napětí (Pa)

a – délka trhliny (m)

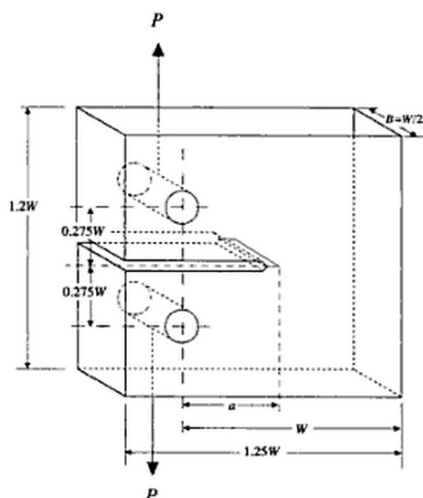
- **Lomová houževnatost** K_{IC} [$MPa \cdot mm^{1/2}$]

Lomová houževnatost je kritická hodnota parametru K_I pro růst trhliny. Závisí na řadě faktorů. Z materiálových charakteristik to je zejména chemické složení, struktura, čistota materiálu. Z ostatních vlivů má na lomovou houževnatost zásadní vliv teplota a rychlost deformace [6].

Zkouška kompaktního napětí

Typická zkouška tělesa s trhlinou, takzvaná zkouška kompaktního napětí, je znázorněn na obrázku 2.4-1. Z výsledků zkoušky můžeme stanovit kritické hodnoty zatížení k lomu vzorku s již existující ostrou trhlinou. Zjištěná lomová houževnatost pak může sloužit

například při konstrukčním návrhu pro stanovení citlivosti mechanicky namáhané konstrukce na přítomnost trhlin.



Zkušební vzorek je znázorněn na obr. 2.4-1. Je to deska stejnoměrné tloušťky. Rovina na okraji trhliny délky a je kolmá ke směru působícího zatížení. Trhlina se tvoří na špičce vrubu tak, aby celková efektivní délka trhliny byla právě a . Nejběžnější metoda pro pozorování vzniku trhliny v tvárném kovu jako je ocel, je zkoušení mechanické únavy. Vzorek, který obsahuje vrub, je předmětem velkého počtu zatěžujících cyklů nízkých amplitud střídavého napětí. Ten je pak zatěžován až do porušení pro stanovení kritické hodnoty působícího zatížení. Přítomnost vrubu koncentruje napětí na špičce vrubu tak, že způsobuje místní tečení, které spolu s únavovým zatížením vyústí v lom [5].

Obr. 2.4 -1: Zkušební vzorek pro zkoušku kompaktního napětí [5].

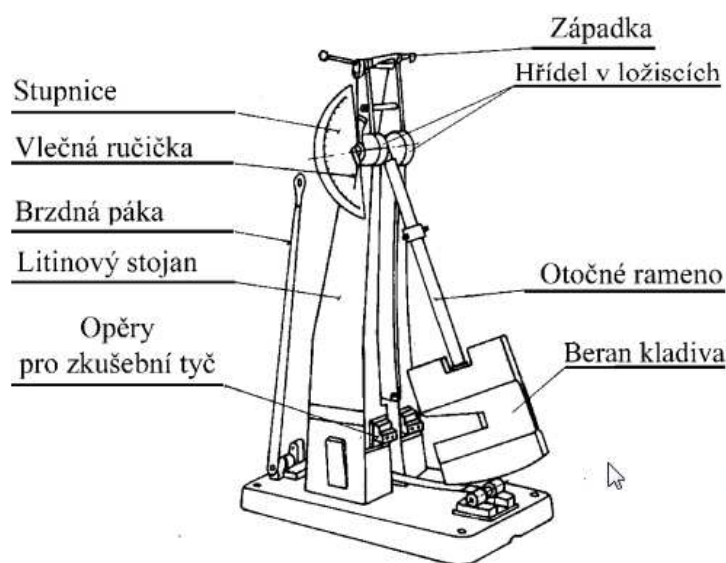


Obr. 2.4 -2: Průběh zkoušky kompaktního napětí [31].

Existuje množství variant této zkoušky. Vzhledem k různým mechanismům nukleace trhlin ve vztahu k různým materiálům, jsou i metody zkoušení obvykle specifické pro určitou skupinu materiálů [5].

Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho

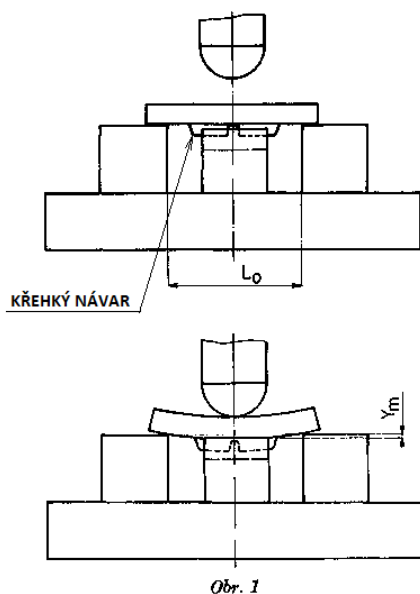
Zkouška rázem v ohybu spočívá v přeražení jednostranně vrubovaných zkušebních tyčí nárazem beranu (Charpyho rázového kyvadlového kladiva). Vruby se vytvářejí uměle, mají tvar U nebo V. Zkouška končí úplnou destrukcí neboli přeražením zkušebního vzorku. Cílem zkoušky je stanovení nárazové práce. Z hodnoty nárazové práce je možno stanovit vrubovou houževnatost materiálu [11, 32].



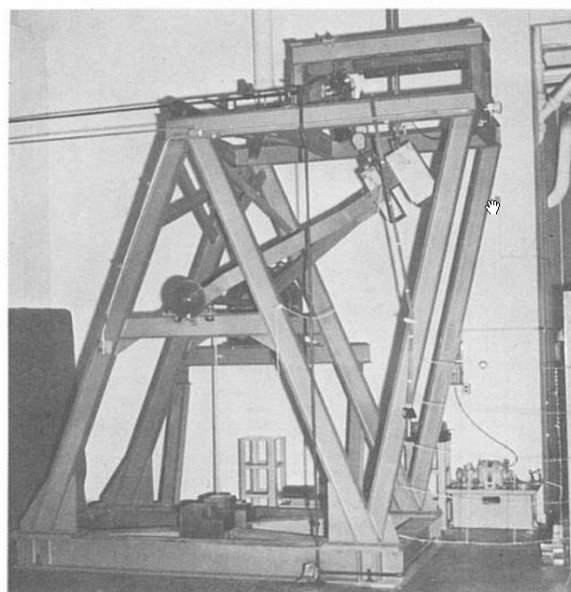
Obr. 2.4-3: Charpyho rázové kladivo. Vlevo schéma, vpravo skutečné [32].

Zkouška padajícím závažím (DWT drop weight test)

Pomocí této zkoušky se stanovuje tranzitní teplota, při které se charakter lomu mění z tvárného na štěpný. Zkušební těleso je svařenec opatřený vrubem, který slouží jako iniciátor křehkého lomu. Těleso je podepřeno tak, aby byl umožněn jen omezený průhyb zkušebního tělesa, při kterém dojde k prasknutí pouze navařeného tělesa a tepelně ovlivněné zóny. Zkouška se provádí na padostroji nebo na rázovém kladivu, zatížení je dynamické, princip je patrný z obrázku 2.4-4 [33].



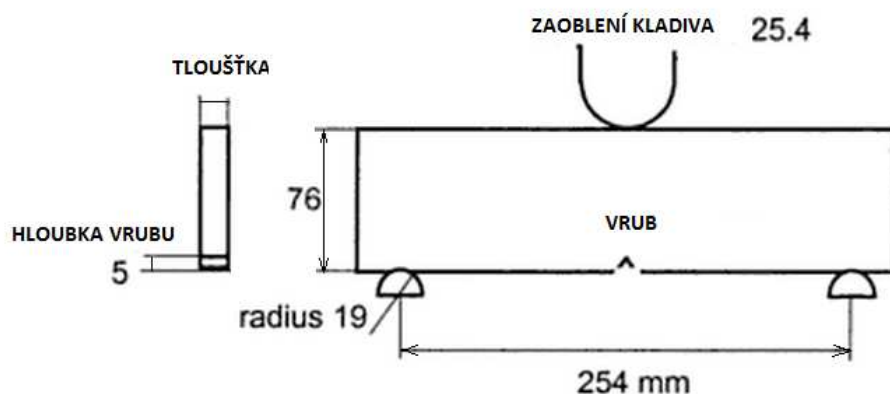
Obr. 2.4-4: Drop weight test [34].



Obr. 2.4-5: Rázové kyvadlo pro drop weight test [34].

Zkouška rázem v ohybu velkých těles původní tloušťky (DWTT – drop weight tear test)

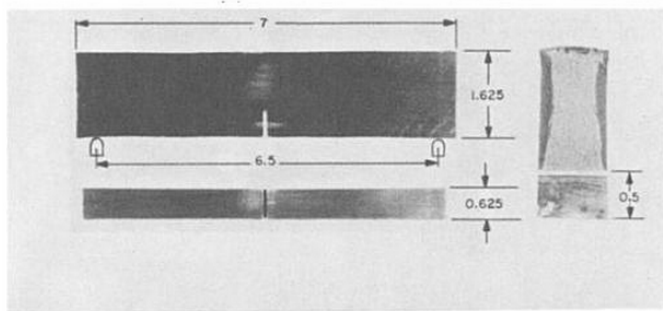
Pomocí této zkoušky se stanovuje tranzitní teplota, při které se charakter lomu (zejména u ocelových plechů a trubek) mění z tvárného na štěpný. Zkušební těleso je opatřeno ostrým lisovaným V vrubem, zkouška se provádí na padostroji nebo rázovém kladivu, zatížení je rázové ohybem do úplného rozlomení, princip je patrný z obrázku 2.4-6 [34, 35].



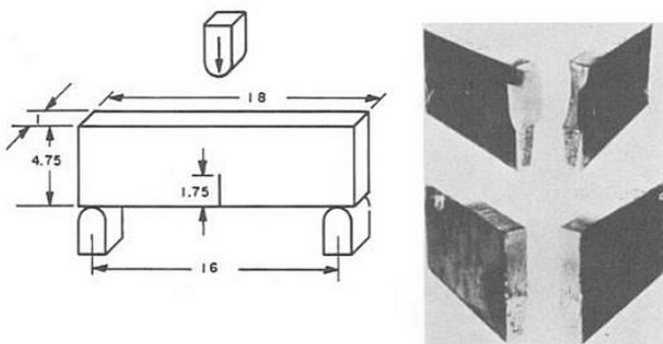
Obr. 2.4-6: Příklad zkoušky rázem v ohybu velkých těles původní tloušťky [34].

Zkouška rázem v ohybu velkých těles (DT dynamic tear)

Pomocí této zkoušky se stanovuje nárazová práce. Zkušební těleso je opatřeno vrubem, který je vytvořen tak, aby iniciace trhliny nastala v počáteční fázi zatěžování a dochází k rychlému progresivnímu štěpení. Zkouška se většinou provádí na rázovém kladivu, zatížení je tedy obvykle rázové, princip je patrný z obrázku 2.4-7 [8, 33].



Obr. 2.4-7: Zkušební těleso pro dynamic tear test, rozměry jsou v palcích [35].



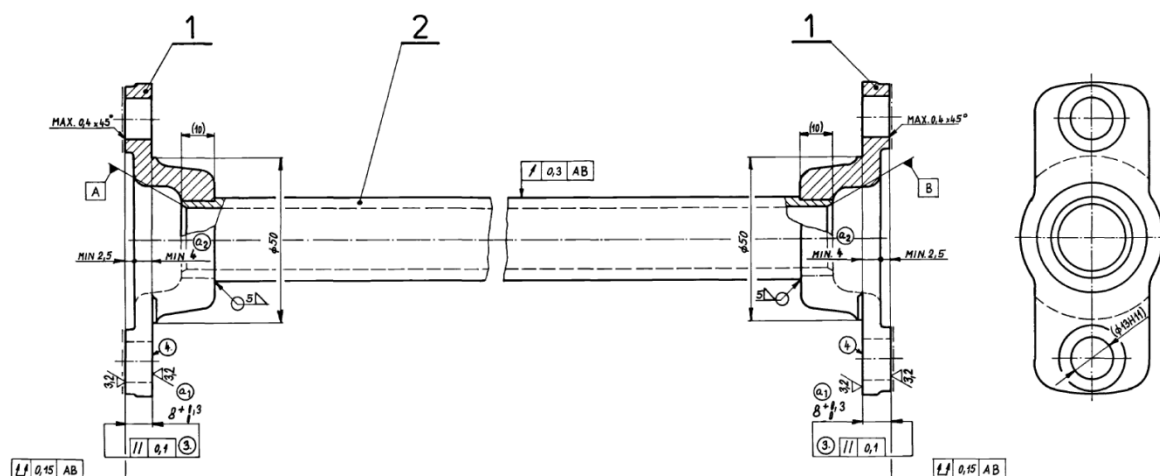
3 Experimentální část

Analýza hřídele náhonu kompresoru zjišťuje příčinu havárie součásti, kterou deklaroval uživatel autobusu TEDOM C12 G v reklamačním listu 156.09.TR. Autobus je v provozu od 20. 6. 2008. Do havárie hřídele najel 105 239 km. Fraktografický rozbor hřídele byl proveden pomocí světelné a elektronové mikroskopie. Součástí experimentální části je také metalografický rozbor, který ověřuje shodu s předepsaným materiálem.

Použitá výkresová dokumentace a fakta z ní zmíněná jsou výhradním duševním vlastnictvím TEDOM, a.s. Práce má tedy interní povahu a nelze ji volně šířit.

3.1 Popis součásti a zkušební postup

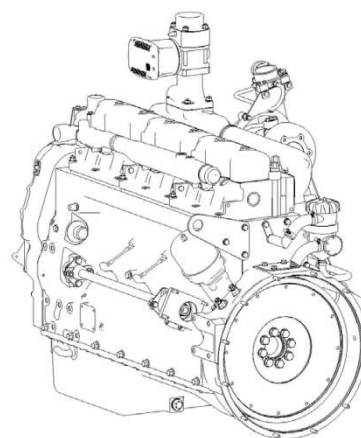
Analýze byla podrobena hřídel náhonu kompresoru H-3111-002-02 včetně části spojkových lamel. Nejdříve byla provedena metalografická analýza hřídele a listů spojky. Následně byly prozkoumány a zdokumentovány lomové plochy.



Obr. 3.1-1: Hřídel H-3111-002-02, pohled z výkresové dokumentace [36].



Obr. 3.1-2: Hřídel H-3111-002-02, skutečný [36].



Obr. 3.1-3: Ilustrační pohled na kompresor [36].

3.2 Použitá zařízení

Metalografická analýza

Metalografický průzkum byl proveden na mikroskopu EIPHOT 200 (NIKON). Výstup mikroskopu byl přeměrován do digitální kamery DS-5M-U1 (NIKON) a struktura byla nasnímana pomocí metalografického softwaru NIS-Elements 3.0. Vzorky byly odděleny na rozbrušovací pile ISOMET 1000, preparovány na elektro-hydraulickém lisu SIMPLIMET 1000, broušeny a leštěny na brusce a leštičce BETA s automatickou hlavou VECTOR. Vzorky byly zalisovány do Dentakrylu a struktura byla ve všech případech naleptána roztokem Nital (2% roztok HNO_3).

Fraktografická analýza

Lomové plochy byly pozorovány elektronovým rastrovacím mikroskopem Tescan Vega XMU. Lom byl také prozkoumán světelným mikroskopem a fotografické snímky ploch byly zdokumentovány digitálním fotoaparátem COOLPIX 4500 (NIKON). Při kontrole rozměrů svaru byly použity měrky svarů INOX.

3.3 Výsledky měření

3.3.1 Metalografická analýza

Metalografický rozbor hřídele byl již proveden ve výchozí zprávě [36], ale vzhledem k tomu, že jsou ve zprávě uvedeny pouze závěry bez snímků struktury a také v rámci ověření shody materiálu byla metalografická analýza provedena opětovně.

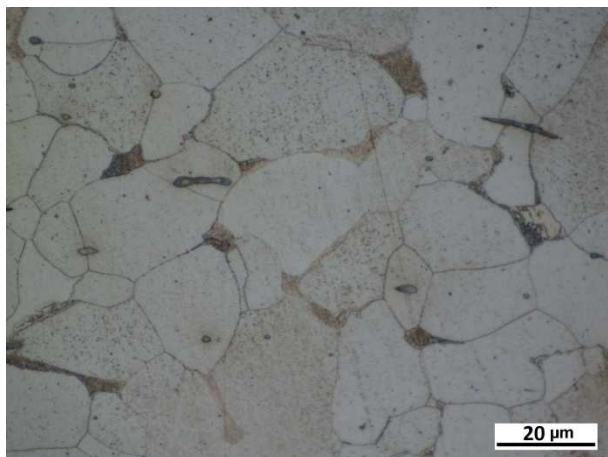
Tabulka 1: Naměřená tvrdost, a převedená pevnost [36].

HV30	Trubka	Svar*	TOZ svaru*	Unašeč	Lamely	Poznámka
Min	116	253	158	200	390	
Max	124	300	250	216	430	
Rm [MPa] (střední)	385	870	560	665	1281	ISO 18265 tab. A1, B2

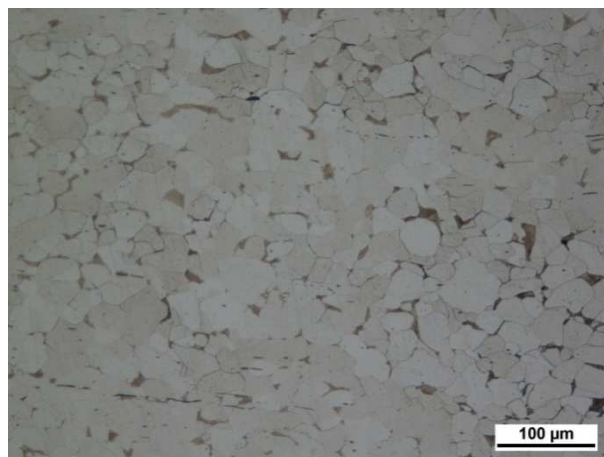
* – HV 0,2

Trubka (předepsaný materiál 11 353.1)

Strukturu trubky dokumentuje snímek 3.3.1-1 a 3.3.1-2. Materiál odpovídá podeutektoidní oceli po normalizačním žíhání, který je shodný s ocelí třídy 11. S přihlédnutím k určené pevnosti se patrně jedná o konstrukční ocel 11 353.1. Přímou na snímku je pak vidět rovnoměrné zrno feritu, odpovídající právě stavu po normalizačním žíhání. Bílá pole představují ferit, tmavá perlit.



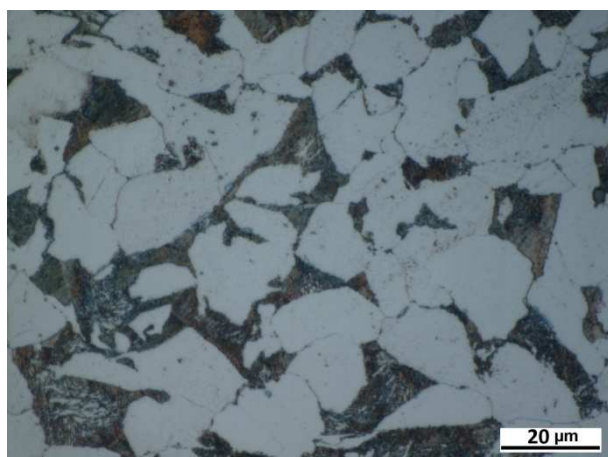
Obr. 3.3.1-1: Struktura trubky, 200x, Nital.



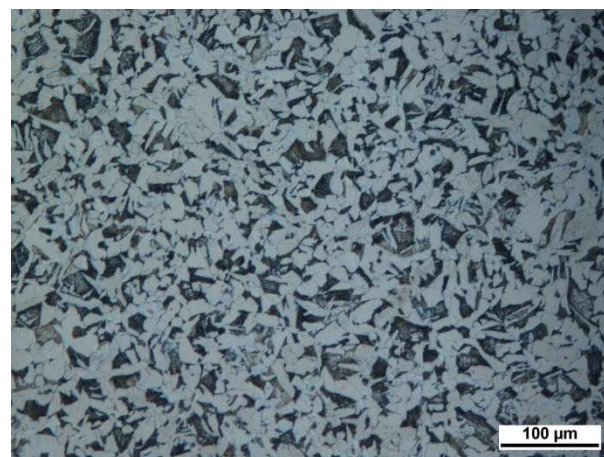
Obr. 3.3.1-2: Struktura trubky, 1000x, Nital.

Unašeč (předepsaný materiál 11 523.1)

Materiál unašeče dokumentuje snímek 3.3.1-3 a 3.3.1-4. Tato jemnozrnná struktura odpovídá nelegované konstrukční oceli třídy 11 po normalizačním žíhání. Vzhledem k určené pevnosti a nasnímané struktuře není důvod se domnívat, že se nejedná o předepsaný materiál 11 523.1. Přímo na snímku jsou opět vidět bílá pole feritu a tmavá pole perlitu.



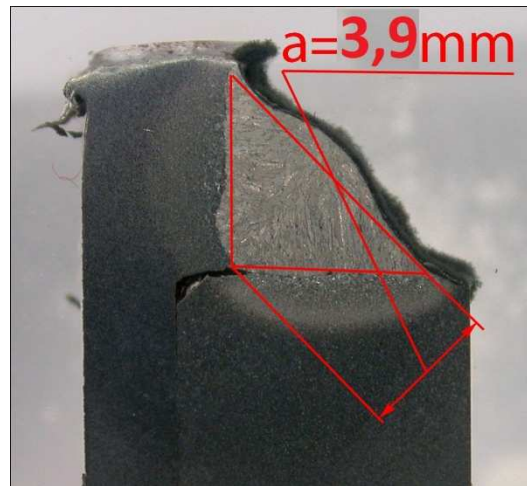
Obr. 3.3.1-3: Struktura unašeče, 200x, Nital.



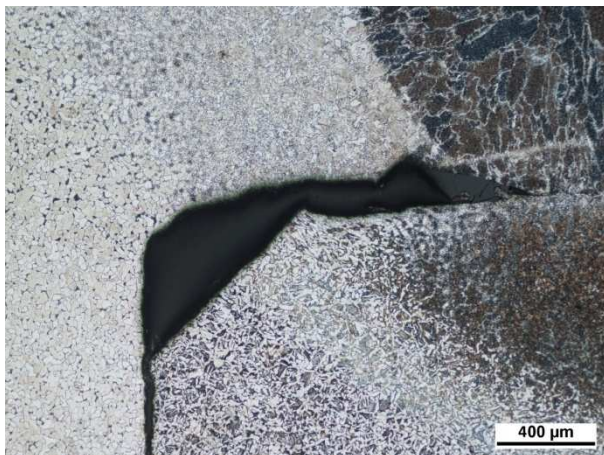
Obr. 3.3.1-4: Struktura unašeče, 1000x, Nital.

Svar (přídavný materiál P44.13C ČSN 05 5390, C-0,10%, Si-0,65% Mn-1,10%)

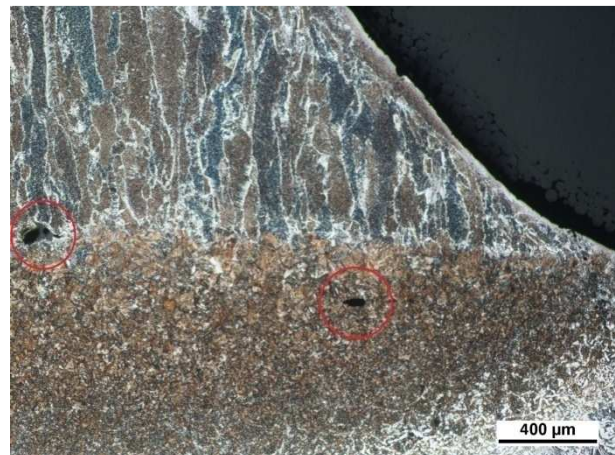
Vnější vizuální kontrola svaru nenalezla žádné vady. Svar byl z vnějšího pohledu proveden dle výkresu. Výška svaru měřená měrkou odpovídá předepsané hodnotě (a5). Výbrus ale ukázal, že v místě řezu (obr. 3.3.1-5) je rozměr koutového svaru o málo menší. Kontrola měrkou byla pravděpodobně zkreslena mírným převýšením – vyboulením. Hloubka závaru, neboli promíšení základního a přídavného materiálu, je poměrně malá, tudíž je i kořen svaru neprovařen. Toto místo pak působí jako vrub a také zmenšuje nosný průřez (Obr. 3.3.1-6). Dále byly nalezeny malé dutiny o maximálním rozměru 180μm, který je dle ISO 5817 přípustný. Ve svaru byla nalezena struktura křehkých složek, konkrétně šlo o bainit a perlit (obr. 3.3.1-8), ale také se zde objevuje acikulární ferit, který je naopak houževnatý.



Obr. 3.3.1-5: Svar, vlevo místo extrakce, vpravo výbrus.



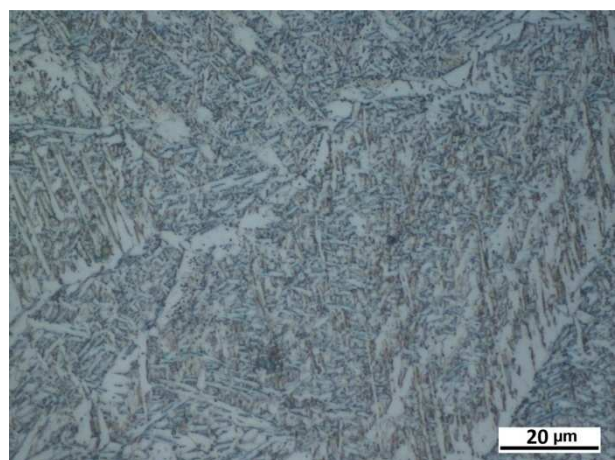
Obr. 3.3.1-6: Svar, neprůvar, 50x, Nital.



Obr. 3.3.1-7: Svar, dutiny, 50x, Nital.

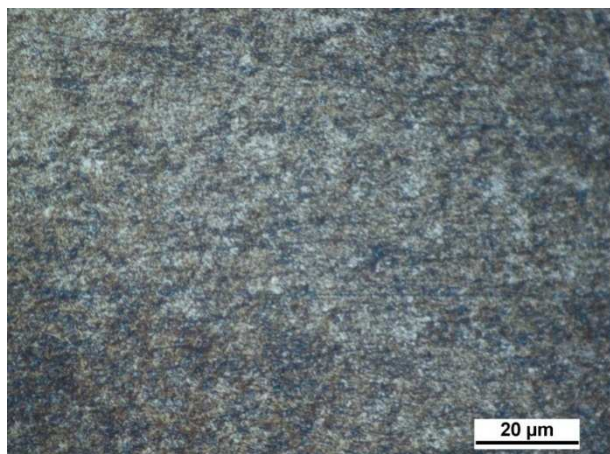


Obr. 3.3.1-8: Svar, bainit a perlit, 1000x, Nital.



Obr. 3.3.1-9: Svar, acikulární ferit, 1000x, Nital.

Lamely (předepsaný materiál nebyl znám)



Struktura lamel je na obrázku 3.3.1-10. Je zde vidět jemnozrnná struktura globulárního cementitu, v které jsou uložena světlá pole popouštěného martenzitu. Struktura lamel odpovídá konstrukční oceli uhlíkové ušlechtilé po kalení a popouštění a naměřená tvrdost tomu také odpovídá. Pravděpodobně se jedná o pružinovou ocel 12 080.

Obr. 3.3.1-10: Struktura lamel, 1000x, Nital.

3.3.2 Fraktografická analýza

3.3.2.1 Makroskopická analýza, světelná mikroskopie

Nejprve byl celý hřídel ohledán pouhým okem. Rovina lomu svírá s osou otáčení hřídele přibližně 45°. Takovéto porušení v šikmých řezech, v nichž působí největší tahové napětí, je typické pro náhlé torzní porušení. Na trubkové části hřídele byl nalezen adhezní prstenec způsobený pravděpodobně kontaktem s cizím tělesem, viz obr. 3.3.2.1-1. Styk s tímto tělesem mohl vyvolat přidavné ohybové namáhání, které v kombinaci s provozním krutovým namáháním mohlo zapříčinit lom hřídele.



Obr. 3.3.2.1-1: Otlak na trubce [36].

Vlivem provozu po porušení hřídele došlo k téměř kompletnímu plastickému přetvoření lomových ploch jejich vzájemným kontaktem. Původní lomové plochy jsou jen v místě svaru, viz obr. 3.3.2.1-2. Tyto původní plochy jsou matné, blíže ose otáčení jsou málo členité, ve svaru jsou členité více. Lomové plochy neobsahují postupové čáry, nebo jiné makroskopické znaky únavového charakteru. Žádné jiné makrofraktografické znaky zdůrazňující existenci vad taktéž nebyly nalezeny.



Obr. 3.3.2.1-2: Lomová plocha ve svaru.

Ohledně mechanismu destrukce lamel se zcela ztotožňují s interní zprávou firmy TEDOM [36]. Lom spojkových lamel byl iniciován pod šrouby, vlivem provozního namáhání v kombinaci s utahovacím předpětím. Lomové plochy lamel odpovídají porušení nízkocyklovou únavou, morfologii s hrubými postupovými čarami dokumentuje je obr. 3.3.2.1-3.



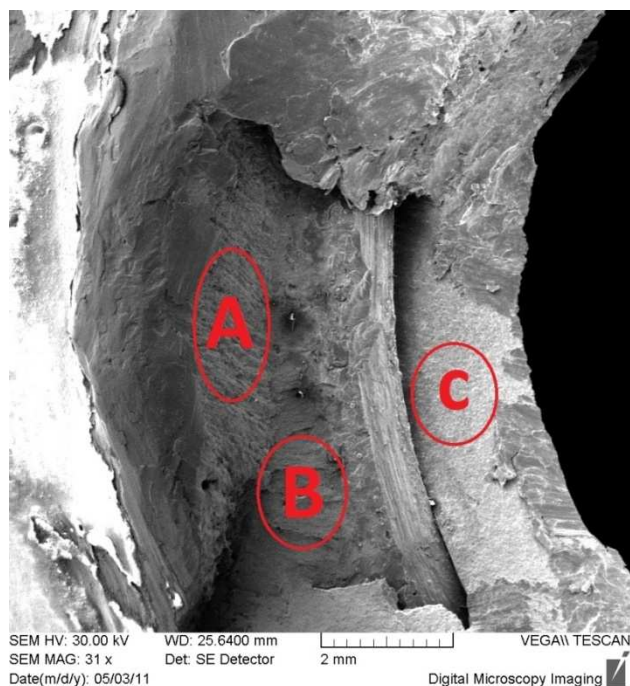
Obr. 3.3.2.1-3: Lom spojkových lamel.



Obr. 3.3.2.1-4: Zbytky lamel pod šrouby hřídele [36].

3.3.2.2 Analýza pomocí elektronové mikroskopie

Způsob porušování na základě makrosnímků lomové plochy není patrný. Hřídel byl tedy následně analyzován pomocí řádkovací elektronové mikroskopie, a to v oblastech označených A, B, C podle obrázku 3.3.2.2-1. Jednotlivým částem lomové plochy jsou pak přiřazeny jejich mechanismy porušování a díky tomu bylo možné stanovit hypotézu průběhu porušení hřídele.

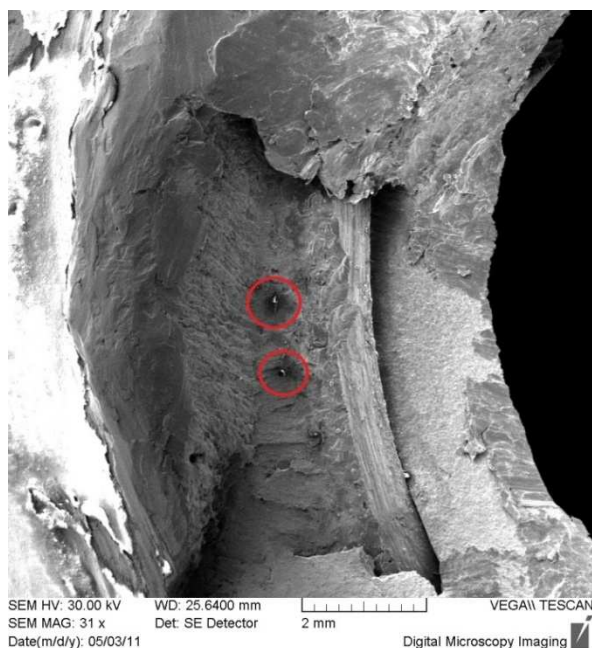


Obr. 3.3.2.2-1: Oblasti A, B, C, SEM.

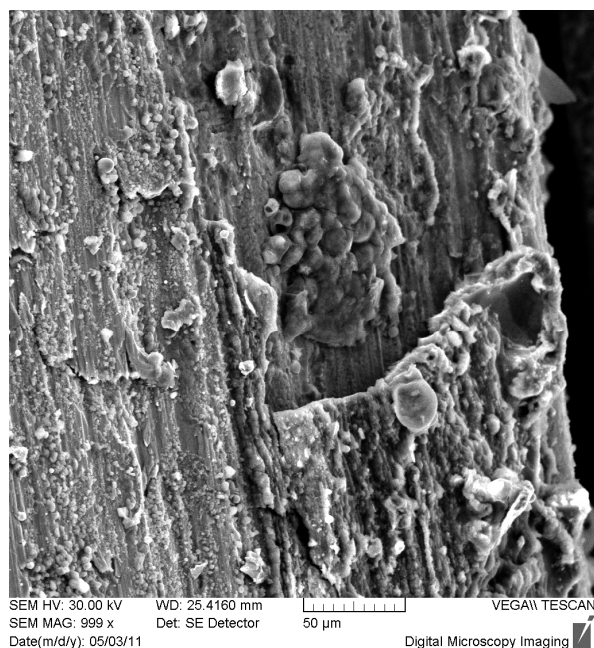


Obr. 3.3.2.2-2: Hrana oddělující komponenty svařence, světelný mikroskop. 1–trubka, 2–unašeč, 3–hrana unašeče

Před zkoumáním vzorku bylo potřeba odstranit znečištění povrchu lomových ploch, avšak některé nečistoty na vzorku zůstaly, jsou označeny na obrázku 3.3.2.2-3. Téměř celý povrch lomu byl znehodnocen korozí, která je zdokumentována na obrázku 3.3.2.2-4. Fraktografická analýza tím byla velmi ztížena.

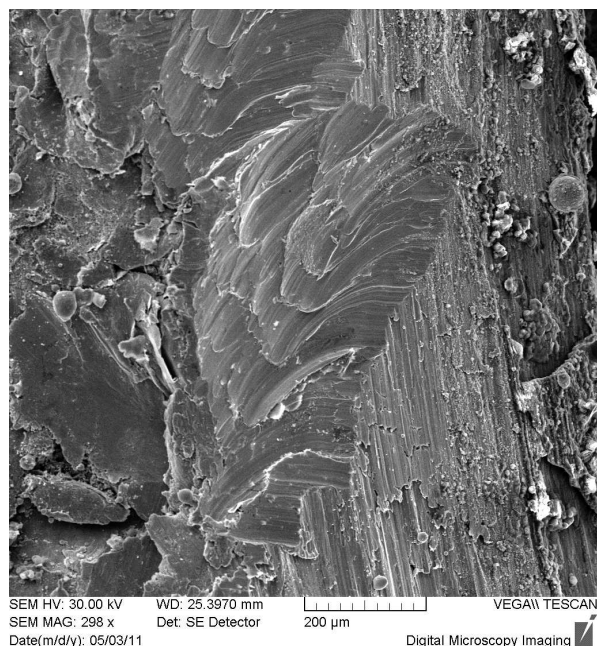


Obr. 3.3.2.2-3: Nečistoty.

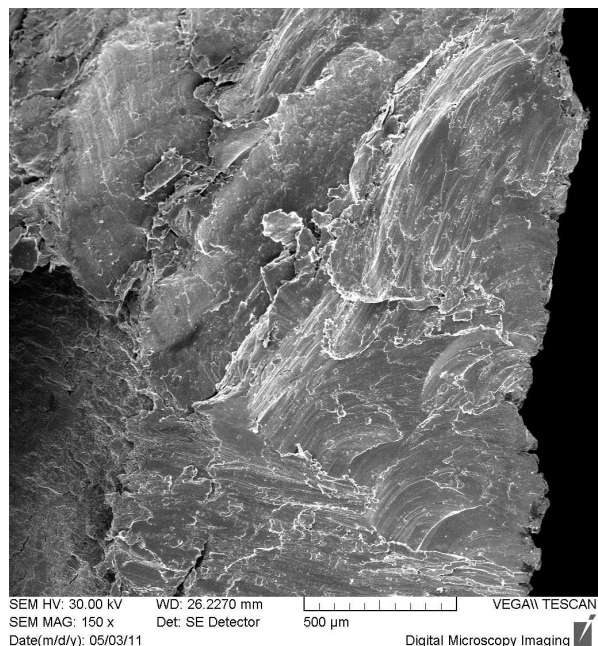


Obr. 3.3.2.2-4: Koroze.

Rovněž je nutné zopakovat, že původní lomová plocha je jen v místě svaru a ostatní plochy jsou výrazně plasticky přetvořené. Deformované plochy reprezentují otlaky na snímcích 3.3.2.2-5a a 3.3.2.2-5b.



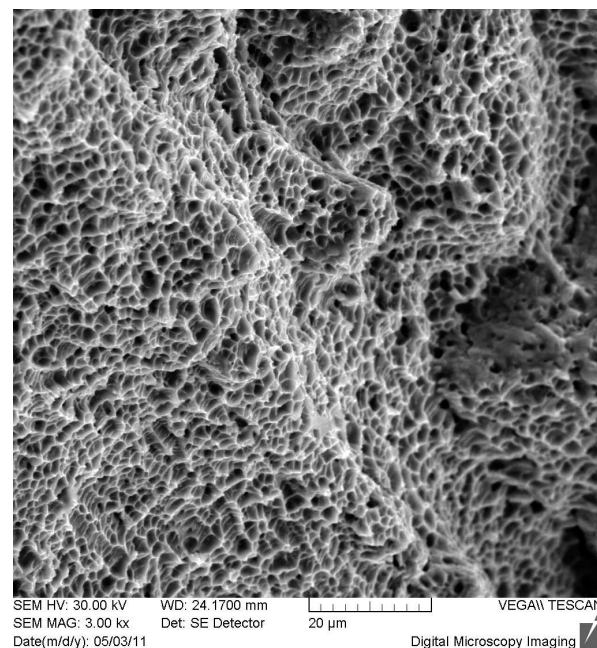
Obr. 3.3.2.2-5a: Otlaky 1.



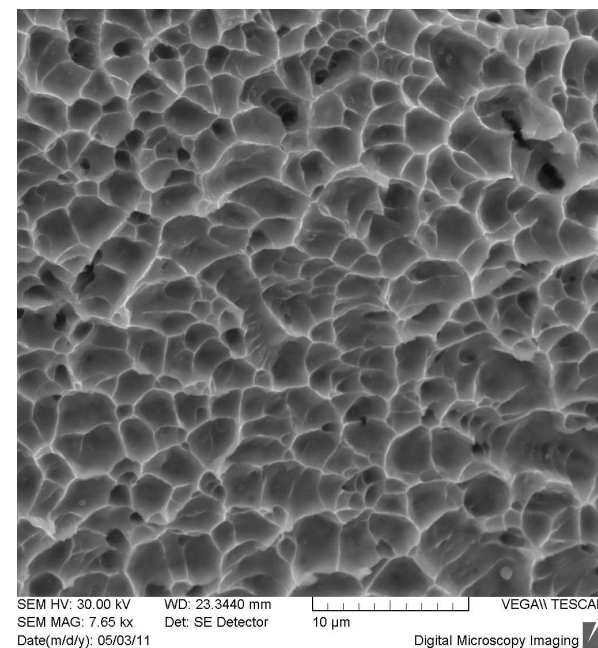
Obr. 3.3.2.2-5b: Otlaky 2.

Oblast A

Lomová plocha oblasti A nese morfologické znaky typické pro lom houževnatý, vzniklý mechanismem tvárné separace. Tvárný lom nastává mechanismem koalescence mikrodutin, který na lomové ploše zanechá typické jamky, které jsou vidět na obrázcích 3.3.2.2-6a a 3.3.2.2-6b [1].

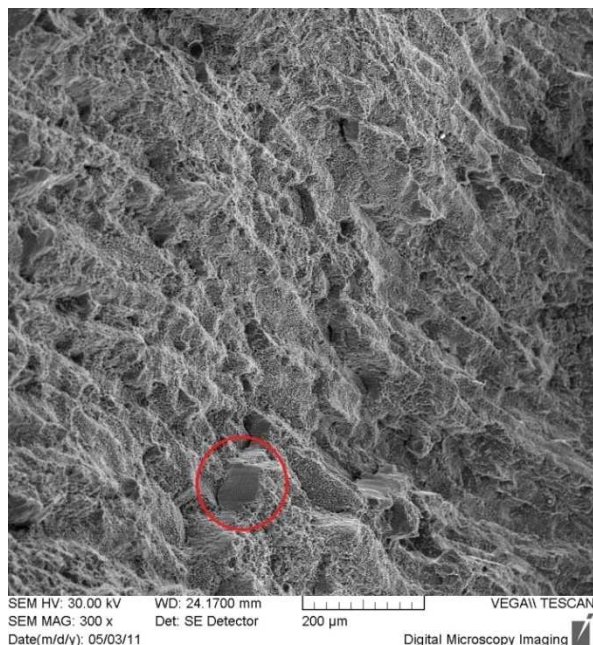


Obr. 3.3.2.2-6a: Oblast A, jamková morfologie, 3000x.

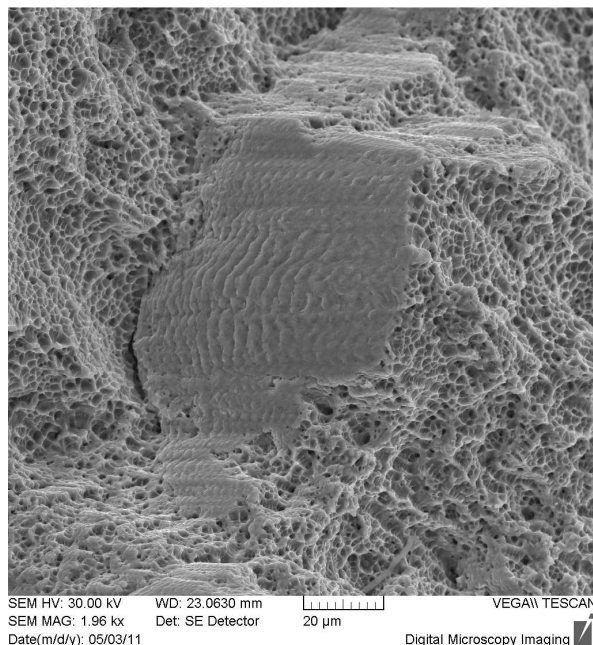


Obr. 3.3.2.2-6b: Oblast A, jamková morfologie - detail, 7650x.

Při větším zvětšení jsou v této oblasti patrné i osamocené striační pásy (obrázky 3.3.2.2-7a a 3.3.2.2-7b), které poukazují na únavový charakter lomu.



Obr. 3.3.2.2-7a: Oblast A, izolované striační pásy, 300x.

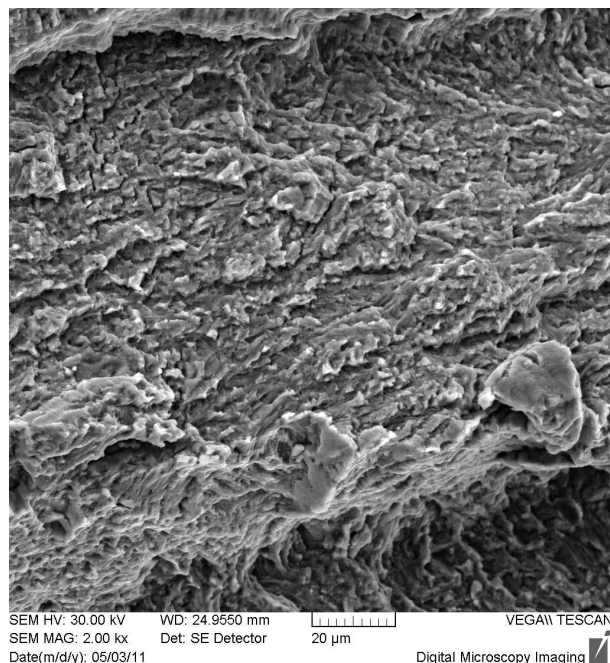


Obr. 3.3.2.2-7b: Oblast A, izolované striační pásy - detail, 1960x.

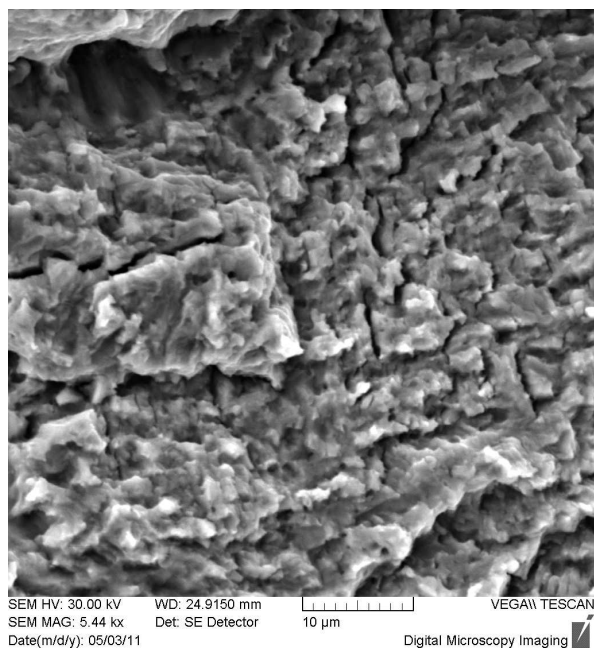
Oblast B

Snímek oblasti B na obr. 3.3.2.2-8 ukazuje nerovné pole neobvyklých fazet, mezi kterými jsou patrné trhliny. Tyto fazety jsou pravděpodobně způsobené štěpením při šíření trhliny. V části oblasti B byly také nalezeny četné oválné útvary (obr. 3.3.2.2-10), ale pouze v okolí globulárních inkluzí, které obsahují zejména mangan a křemík. Tyto oválné útvary poukazují na místní charakter kvazištěpného porušení, s možným vlivem vodíkové křehkosti. Původ inkluzí je zjevně v přídavném svařovacím materiálu a jejich rozložení ukazuje obrázek 3.3.2.2-11.

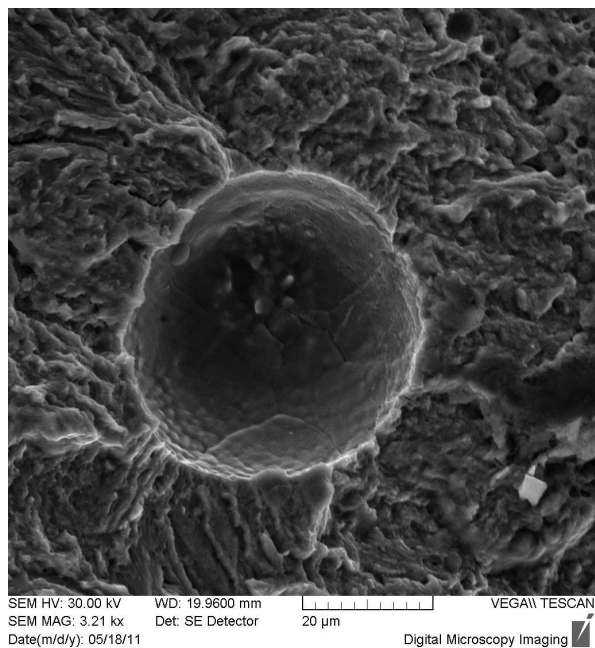
Rysy oblasti B jsou také velice podobné speciálnímu typu lomu, takzvanému TTS (Tearing Topography Surface). Mechanismus vzniku takovéto morfologie není dosud objasněn, ale vyskytuje se v různých slitinách včetně ocelí, mimo jiné za podmínek únavy a vodíkové křehkosti. Tento speciální lom se často vyskytuje s takzvaným DR (Decohesive Rupture), tedy s dekohezivním praskáním, které by vysvětlovalo oválné útvary [2].



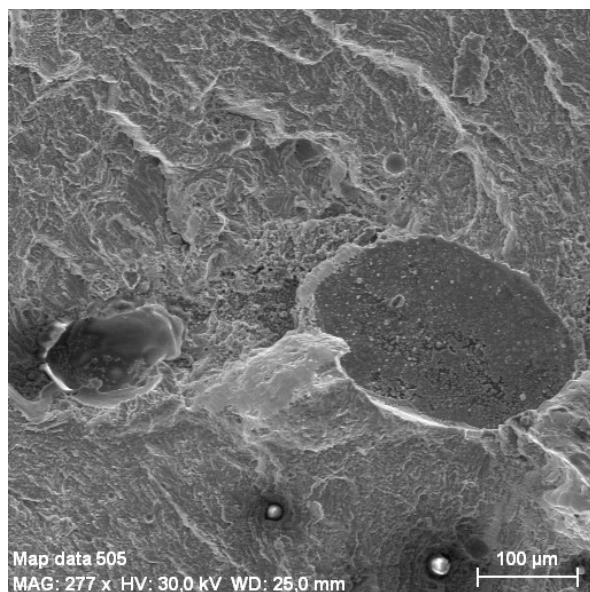
Obr. 3.3.2.2-8: Oblast B.



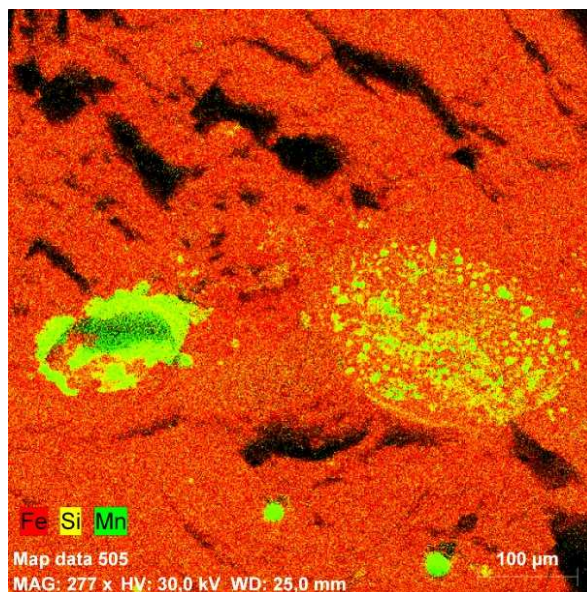
Obr. 3.3.2.2-9: Oblast B, neobvyklé fazety.



Obr. 3.3.2.2-10: Oblast B, oválný útvar.

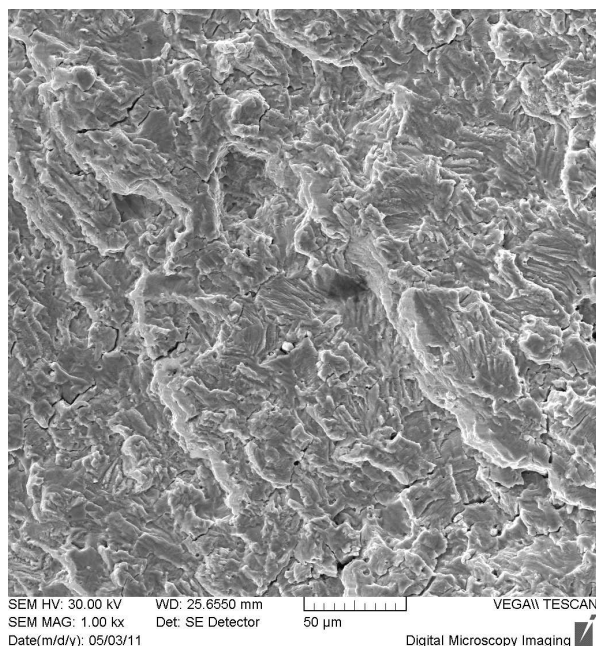


Obr. 3.3.2.2-11: Oblast B, EDX v místě s oválnými útvary.

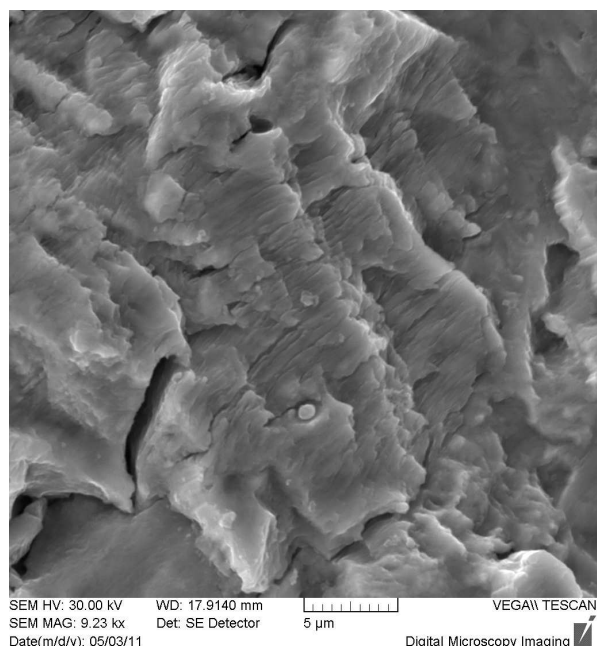


Oblast C

Přestože se v této oblasti nenachází makroskopická pásma typická pro únavový lom, tak při vyšších hodnotách zvětšení byly na lomové ploše nalezeny malé brázdy, takzvané striace (obr. 3.3.2.2-12), které jsou typickým znakem právě únavového lomu a vznikají cyklickou plastickou deformací porušovaného materiálu. Taktéž se zde nachází štěpné fazety z nichž mnohé jsou odděleny sekundárními trhlinami [1, 2].



Obr. 3.3.2.2-12a: Oblast C, 1000x.



Obr. 3.3.2.2-12b: Oblast C, detail striací, 9230x.

3.4 Shrnutí a diskuze

Analýza, zejména pomocí elektronové mikroskopie, odhalila několik zásadních poznatků, které jsou níže diskutovány ve čtyřech bodech:

- Makroskopická analýza objevila na trubkové části hřídele otlak způsobený pravděpodobně kontaktem s cizím tělesem, styk s tímto tělesem mohl vyvolat přídatné cyklické ohybové namáhání, které v kombinaci s provozním krutovým namáháním mohlo zapříčinit přetížení hřídele nízkocyklovým namáháním. Navíc i porušení lamel nese znaky nízkocyklové únavy. Logickým závěrem by tedy bylo i nízkocyklové únavové porušení hřídele.
- Metalografické hodnocení komponent svařence prokázalo shodu s předepsaným materiálem, avšak svar, díky přítomnosti křehkých složek (bainit a perlit) a nedostatečnému provaření, představuje nebezpečné místo pro iniciaci a šíření lomu. Na šíření trhliny v místě svaru se také podílely četné globulární inkluze obsahující mangan a křemík. Útvary v místě zmíněných inkluzí se zabývá samostatný bod níže. Pro účely tohoto bodu, zabývající se svarem jako celkem, pouze krátce doplním, že podle nalezených fraktografických znaků nelze jednoznačně tvrdit, že na těchto inkluzích rekombinoval vodík a způsobil vysoká vnitřní napětí mechanismem vodíkového křehnutí. Je tu i možnost, že bylo nalezené kvazištěpení způsobeno samotnou přítomností vysoké koncentrace oněch inkluzí, anebo i jiným mechanismem porušení. Původ těchto inkluzí je zjevně v přídatném svařovacím materiálu.
- V poli neobvyklých fazet, v místech globulárních inkluzí, byly nalezeny četné oválné útvary, které obsahují zejména mangan a křemík. Tyto oválné útvary poukazují na místní charakter kvazištěpného porušení. Pro vznik této morfologie se nabízí hypotéza, že ke štěpení došlo vlivem prostředí. Lze tak usoudit z mikromorfologie oblasti B jako celku, která je velice podobná jak lomu vlivem vodíkového zkřehnutí tak koroznímu praskání. Obě tyto morfologie neobsahují žádný zásadní rozdíl v mikrofraktografických rysech, avšak oválné útvary připomínající takzvaná „rybí oka“, jsou typická právě pro vodíkové praskání. Přítomnost

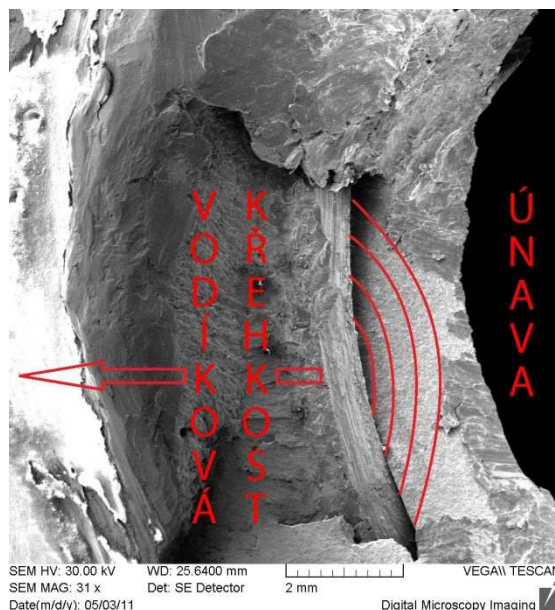
vodíkového praskání taktéž podporuje fakt, že se nacházíme v oblasti svaru a vstup vodíku do struktury mohlo například zapříčinit svařování vlhkých povrchů, při kterém dochází k termickému rozkladu vody. Navíc svařované konstrukce obecně jsou citlivé k vodíkem indukovanému praskání. Dalším argumentem pro vodíkové praskání je fakt, že materiálem hřídele je feritická ocel a vodík rozpuštěný ve feritické oceli intersticiálně velmi snadno difunduje v mřížce železa alfa. Také se všechna místa rybích ok nacházela na hranici mezi inkluzí a matricí, žádný lom napříč inkluzí nebyl pozorován, a to odpovídá konceptu vodíkového křehnutí, který ztrátu pevnosti přisuzuje právě koncentraci vodíku v těchto oblastech. Proti této hypotéze ovšem také vypovídá několik zásadních faktů. Takovéto formě praskání podléhají zejména vysokopevnostní ocele, pro vodíkové zkřehnutí materiálu hřídele (11353, 11521) je potřeba nepravděpodobně velké množství vodíku. Navíc po pečlivém prozkoumání oněch oválných fazet nebyl ani u jedné prokázán typický koncept rybího oka s jasnou inkluzí uprostřed a radiálními paprsky. Proti tomuto protiargumentu lze ovšem namítnout, že tvar a podoba „rybích ok“ silně závisí na působícím napětí. Morfologie oblasti s rybími oky je také vysvětlitelná mechanismem DR (decohesive rupture), který dekohezi na hranici inkluzí přisuzuje i jiným vlivům, nejen vodíkové křehlosti. S ohledem na chemickou podstatu nalezených inkluzí a na jejich lokalizaci v nedostatečně provařeném místě svaru lze porušení vysvětlit také takto: Nalezené inkluze obsahují mangan a křemík. Tyto prvky mimo jiné fungují v přídavných svařovacích materiálech jako deoxidační a desulfurační přísada, která převede vzniklé sloučeniny mimo svar a vyčistí tak taveninu. Vzhledem k nedostatečnému provaření kořene svaru a mělkému závaru mohlo právě v těchto místech dojít k vysoké místní koncentraci oněch prvků, jejichž samotná přítomnost ve struktuře mohla působit jako slabé místo a usnadnit (či přímo iniciovat) šíření lomu bez jakékoli interakce s vodíkem [1, 2, 17, 37, 38].

- Přestože lomové plochy hřídele neobsahují žádné makroskopické znaky únavového porušení, tak přítomnost striací únavový charakter jasně dokládá. Je velice pravděpodobné, že byl únavový lom iniciován kombinací provozního krutu s přídavným cyklickým ohybovým napětím, jež mohl vyvolat původce adhezního otlaku. Četné striace byly nalezeny pouze v materiálu trubky. I přes zohlednění známého faktu, že únavový lom vzniká výlučně od povrchu součásti, však nebyly nalezeny žádné znaky ukazující na místo iniciace (makroskopické postupové čáry). Tento zdánlivý rozpor lze jednoduše vysvětlit mnoha způsoby. Například tím, že je většina lomových ploch plasticky přetvořena a nelze tedy zcela vyloučit, že se iniciační místo spolu s makroskopickými postupovými čarami nacházelo právě v místech, která jsou již zdeformovaná. Nebo mohlo být namáhání tak malé amplitudy, že ke vzniku postupových čar nebyl dostatečný silový podmět atd. Případně by nemusely být postupové čáry patrné díky členitému a spíše křehkému charakteru lomu [B].
- Další oblasti lomové plochy vypovídají o smíšeném statickém dolomení, kde tvárný lom prokazuje typická jamková morfologie, a štěpný lom dokládají četné fazety. Tento přechod z tvárního stavu do stavu štěpného lze vysvětlit výraznými změnami mechanických vlastností základního materiálu v tepelně ovlivněné oblasti okolí svaru, a to jak z hlediska samotného tepelného ovlivnění (bainit a perlit ve svaru), tak i z hlediska inkluzí (obsahující mangan a křemík).

3.5 Závěr

Po seznámení se základy fraktografie a teorií únavového porušení byly prostudovány výsledky výchozích zpráv. Některá základní tvrzení zprávy bylo nutné ověřit. Metalografickým rozborem byla potvrzena shoda s předepsaným materiálem, avšak v rozporu se zprávou byly ve svaru nalezeny vady. Lomové plochy byly opětovně makroskopicky pozorovány a vzhledem k tomu, že mechanismus porušení hřídele na základě makrosnímků nebyl patrný, bylo nutné lomové plochy hřídele analyzovat pomocí řádkovací elektronové mikroskopie, a to jednak z hlediska morfologie a také z hlediska chemického složení.

Vzhledem k tomu, že je drtivá většina lomových ploch plasticky přetvořena, lze závěr formulovat jen jako pravděpodobnou hypotézu vzniku porušení. Lom byl pravděpodobně iniciován v místě kořene svaru na rozhraní matrice – inkluze, kde působilo hned několik nepříznivých faktorů. Jednak se zde nacházely právě ony četné globulární inkluze obsahující mangan a křemík, na kterých pravděpodobně rekombinoval vodík a způsobil vysoká vnitřní napětí, jež měla za následek dekohezi na hranicích inkluzí s matricí. Navíc byl v místě iniciace makroskopický vrub způsobený neprovařením kořene svaru. Následně trhlinka stabilně rostla přes místa, kde se nacházela velká koncentrace inkluzí. Nosný průřez oslabený vzniklou trhlinou nebyl schopen odolávat provoznímu krutu (a možnému přidavnému cyklickému ohybovému namáhání) a porušil se mechanismem únavového porušení (pravděpodobně nízkocyklovou únavou), které jednoznačně dokládají nalezené striace. Oblast dále od osy otáčení pak pouze dokládá následné dolomení, které se šířilo výlučně mechanismem tvárného transkrystalického porušení.



Obr. 3.5-1: Průběh porušení hřídele.

Nelze ale také vyloučit, že byl lom, vlivem vrubu a možného přidavného cyklického ohybového namáhání, iniciován únavovou trhlinou v materiálu trubky, na což hřídel pochopitelně nebyl dimenzován a podlehl nízkocyklové únavě. Dále by se trhlinka, pravděpodobně již nestabilně, šířila dále od osy otáčení. V okolí míst oslabených četnými globulárními inkluzemi se lom šířil štěpným a kvazištěpným mechanismem, v materiálu bez inkluzí se porušoval tvárným mechanismem.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Hrivňák, I.: FRAKTOGRAFIA, Bratislava, Alumni-Press, 2009, ISBN 978-80-8096-089-6
- [2] American Society for Metals: ASM Handbook Volume 12: Fractography, ASM International 1987, ISBN 0-87170-007-7
- [3] Wikipedie, otevřená encyklopedie
<http://www.wikipedia.org>
- [4] Parrington, R.: Fractography of Metals and Plastics
http://www.asminternational.org/pdf/Fract_PFA.pdf
- [5] Hull, D.: Fractography: Observing, Measuring and Interpreting Fracture Surface Topography, Cambridge, Cambridge University Press 1999
- [6] Anderson, T.L.: Fracture Mechanics fundamentals and applications, Department of Mechanical Engineering, Texas A&M University College Station, CRC Press LCC 1995
- [7] Koutský, J., Jandoš, F., Karel, V.: Lomy ocelových částí, Praha 1976
- [8] Skupina křehkého lomu, ÚFM AV ČR: Doplnkové materiály pro přednášky
<http://www.ipm.cz/group/fracture/vyuka/>
- [9] Johnsen, J.: Mechanical Behavior
<http://www.exo.net/~jillj/activities/mechanical.pdf>
- [10] Key to Metals AG: Contribution of Fracture Mechanics to Material Design: Part Two
<http://www.keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=PL&NM=250>
- [11] Molliková, E., Kaláb, P., Stránský, L., Sedláček, J.: Zkouška rázem v ohybu
<http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/umvi/zk.raz.ohybu.pdf>
- [12] POŠTA, J., VESELÝ, P., DVOŘÁK, M.: Degradace strojních součástí, Praha, ČZU, 2002, ISBN 80-213-0967-9
- [13] Internetová encyklopedie CoJeCO.cz
http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&id_desc=100894&s_lang=2
- [14] ZCU Fakulta strojní - Katedra materiálu a strojírenské metalurgie: Podklady pro přednášky
http://www.ateam.zcu.cz/sigma_epsilon.gif
- [15] TESCAN, a.s.: Galerie snímků
<http://www.tescan.com/gallery-gallery.php?kat=17&menu=2>
- [16] Internet Electron Microscope website: Failure of Materials
<http://pwatlas.mt.umist.ac.uk/internetmicroscope/micrographs/failure.html>
- [17] Möser, M.: Fractography with the SEM (Failure Analysis)
http://www.martin-moeser.de/Veroeffentlichungen/bethge_fine.pdf

- [18] Rice Unix Facility (RUF) WWW Server: Light Microscopy
<http://www.ruf.rice.edu/~bioslabs/methods/microscopy/microscopy.html>
- [19] Vojtkuláková, Z.: SVĚTELNÁ MIKROSKOPIE
<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/sm/Uvod.html>
- [20] SKOLA.SPECTATOR.CZ: Podklady ke studiu
<http://skola.spectator.cz/>
- [21] American society for testing and materials: Electron Fractography, ASTM International 1968
- [22] Mikš, A.: ZOBRAZOVACÍ METODY V OPTICKÉ MIKROSKOPII
<http://www.mikroskop-mikroskopy.cz/mikroskopicke-metody/>
- [23] Plášek, J., Reischig, J.: Kontrast v optické mikroskopii
<http://www.vesmir.cz/clanek/kontrast-v-opticke-mikroskopii>
- [24] VŠCHT Praha: Podklady pro studium
http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_metalografie_1/teorie.htm
- [25] Ptáčková, M., Vojtkuláková, Z.: Příprava metalografických vzorků
<http://vohryzek.ic.cz/skola/bum/02%20-%20Priprava%20metalografickych%20vzorku.pdf>
- [26] Goodhew, P., Humphreys, F., Beanland, R.: Electron microscopy and analysis, Taylor & Francis 2001
- [27] Reimer, L., Kohl, H.: Transmission electron microscopy: Physics of image formativ, Springer 2008
- [28] College of Arts and Sciences: Transmission electron microscopy
<http://astronomy.nmsu.edu/dept/html/facade.html>
- [29] Schweitzer, J. :Scanning Electron Microscope
<http://www.purdue.edu/rem/rs/sem.htm>
- [30] Oddělení fyziky biomolekul, Fyzikální ústav UK: Učební text k přednáškám
http://biomolecules.mff.cuni.cz/files/courses/Svetlo_v_anizotropnim_prostredi.pdf
- [31] University of Cambridge, Materials Group:Toughness
<http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/properties/non-IE/toughness.html>
- [32] ČSN EN 10045-1: Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho - Část 1: Zkušební metoda (V a U vruby), Praha, Český normalizační institut 1998
- [33] Westmoreland Mechanical Testing & Research, Inc.: Drop Weight Test
<http://www.wmtr.com/Content/DropWeightTesting.htm>
- [34] ČSN 420349: Zkoušení kovů. Stanovení teploty nulové houževnatosti konstrukčních ocelí, Praha, Český normalizační institut 1998
- [35] American Society for Testing and Materials. Annual Meeting: Impact testing of metals, ASTM International 1984

- [36] Skrbek, B.: Interní zprávy č. 842 a 853, TEDOM s.r.o. divize Motory, Jablonec n.N. 2009
- [37] Kubečka P., Váňová P., Jonšta, P., Filuš F.: VLIV POVRCHU NA VODÍKOVÉ ZKŘEHNUTÍ UHLÍKOVÝCH OCELÍ
http://www.ams.tuke.sk/data/ams_online/2007/number4/mag03/mag03.pdf
- [38] Gangloff, R.: HYDROGEN ASSISTED CRACKING OF HIGH STRENGTH ALLOYS
<http://www.virginia.edu/ms/faculty/gangloffCSChapterFinalProofed.pdf>
- [39] Perez, N.: Fracture mechanics, Springer, 2004
- [40] Saxena, A.: Nonlinear fracture mechanic for engineering, CRC Press 1998
- [41] Leinveber, J., Vávra, P.: Strojnické tabulky, Třetí doplněné vydání, Albra 2006
- [42] Růžička, M., Jurenka, J., Hrubý, Z.: Přednášky a cvičení
http://mechanika.fs.cvut.cz/content/files/DPZ/DPZ_Jur01_pr6.pdf
- [43] Roylance, D.: Fatigue
<http://ocw.mit.edu/courses/materials-science-and-engineering/3-11-mechanics-of-materials-fall-1999/modules/fatigue.pdf>
- [44] Kossyh, E., Babich, N.: Evaluation of Metal failure Criteria in the Conditions of Complex Loading
<http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn200/idn200.htm>
- [45] Wilson, W., Clark, W., Wessel, E.: FRACTURE MECHANICS TECHNOLOGY FOR COMBINED LOADING AND LOW-TO-INTERMEDIATE STRENGTH METALS, Pennsylvania 1968
- [46] Sevim, I.: Effect of hardness to fracture toughness for spot welded steel heets
<http://wenku.baidu.com/view/a135df06eff9aef8941e0607.html>
- [47] Alberto Carpinteri, Marco Pagg: Are the Paris's law parameters dependent on each other?
<http://www.gruppofrattura.it/ors/index.php/fis/article/viewFile/13/10>

PŘÍLOHY

Seznam příloh

PŘÍLOHA A: ZÁKLADY LINEÁRNÍ ELASTICKÉ LOMOVÉ MECHANIKY

A.1 GRIFFITHŮV MODEL, ENERGETICKÁ BILANCE	3
A.2 IRWIN, NAPĚŤOVÁ ANALÝZA OKOLÍ TRHLINY	10

PŘÍLOHA B: ODHAD POČTU CYKLŮ DO LOMU

B.1 PARISŮV ZÁKON, POUŽITÉ VZTAHY	1
B.2 APLIKACE PARISOVA ZÁKONA	2
B.3 ZÁVĚR	5

PŘÍLOHA C: SNÍMKY ZE SEM VE VYSOKÉM ROZLIŠENÍ

PŘÍLOHA A

Příloha A: Základy lineární elastické lomové mechaniky

Lomová mechanika je obor mechaniky zabývající se studiem šíření trhlin v materiálu. Podmětem pro rozvoj tohoto vědního oboru byla skutečnost, že se v provozu materiály někdy porušují při nižším nominálním napětí, než je mez kluzu, přičemž příčinou lomu mohou být defekty, jako jsou právě trhliny.

Lineární elastická lomová mechanika (dále jen LELM) je nejstarší obor lomové mechaniky a je základem pokročilejších teorií lomové mechaniky. Postupy LELM jsou platné pro pružný materiál, předpokládají totiž lineární závislost mezi napětím a deformací. Prakticky ji lze například použít pro stanovení kritického napětí nebo kritické délky trhliny pro její nestabilní růst. V LELM existují dva přístupy k popisu napěťových a deformačních podmínek na čele trhliny [3, 6]:

- **Energetická analýza**

Griffith – parametr G (rychlost uvolňování elastické energie neboli hnací síla trhliny)

- **Napěťová analýza**

Irwin (Kinz) – parametr K (součinitele intenzity napětí)

Kritické hodnoty těchto parametrů K_{Ic} a G_{Ic} (určené za podmínek rovinné deformace) vyjadřují materiálovou charakteristiku nazývanou **lomová houževnatost**.

Pohled na lom na atomární úrovni

Lom nastává při působení dostatečného napětí na meziatomové vazby projevující se přitažlivými silami. Obr. A-1 ukazuje potenciální energii a napětí v závislosti na vzdálenosti oddělující atomy. Rovnováha nastává, když je potenciální energie na minimu. Tahová síla nutná ke zvětšení vzdálenosti z rovnovážné polohy musí pro úplné porušení vazeb dosáhnout kohezivní pevnosti. Například Anderson [6] ve své publikaci *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications* odvozuje tuto kohezivní pevnost za předpokladu idealizace meziatomových sil. Působící napětí má tedy sinusový průběh:

$$\sigma = \sigma_c \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{\lambda}\right), \text{ rovnice (A1)}$$

σ – zatěžující napětí (Pa)

σ_c – kohezivní napětí (Pa)

x – prodloužení (m)

λ – míra prodloužení dle obrázku A-1 (m)

Pro malé x platí: $\sin(x) = x$, pak rovnice (A1) vypadá:

$$\sigma = \sigma_c \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{\lambda} \right), \text{ rovnice (A2)}$$

Hookeův zákon nám říká:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = \frac{E \cdot x}{a_0}, \text{ rovnice (A3)}$$

E – modul pružnosti v tahu (Pa)

ε – poměrné prodloužení (1)

a_0 – původní délka=mřížkový parametr (m)

Postavením Hookeova zákona do rovnosti s působícím napětím po úpravě vyjde [6]:

$$\sigma_c = \frac{\lambda \cdot E}{2 \cdot \pi \cdot a_0}, \text{ rovnice (A4)}$$

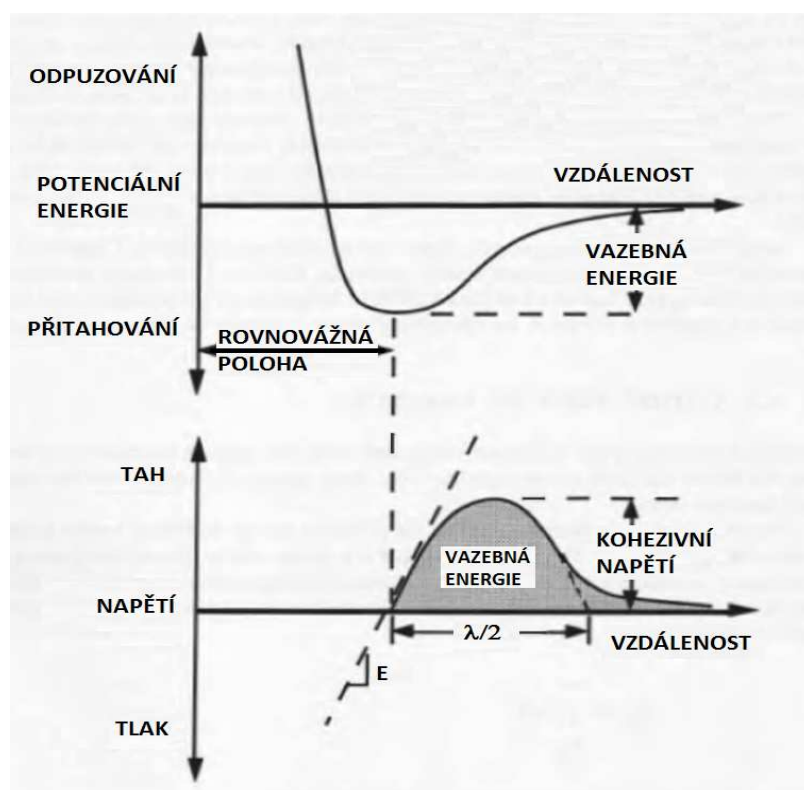
Práce vykonaná meziatomovými silami při vzniku nového jednotkového povrchu je tedy [6]:

$$2 \cdot \gamma_s = \int_0^{\lambda/2} \sigma_c \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{\lambda}\right) dx = \frac{\lambda \cdot \sigma_c}{\pi}, \text{ rovnice (A5)}$$

Číslice 2 před γ_s (povrchová energie) reprezentuje vznik dvou nových jednotkových povrchů.

Kombinací rovnic (A4) a (A5) vyjde [6,39]:

$$\sigma_c = \left(\frac{E \cdot \gamma_s}{a_0} \right)^{1/2}, \text{ rovnice (A6)}$$



Obr. A-1: Potenciální energie a napětí jako funkce vzdálenosti [6].

Inglisův model, koncentrátoři napětí, vliv defektů

Skutečný materiál nedosahuje teoretické kohezivní pevnosti. Monokrystalická vlákna jsou tomuto ideálu nejbližší. Jak je tedy možné, že jisté materiály mají pevnost o několik řádů nižší? Je to mimo jiné hlavně díky existenci pohyblivých dislokací. Stejně jako lze lokálním pohybem atomů dosáhnout globální makroplastické deformace, tak podobně má na celkovou pevnost součásti vliv místní koncentrace napětí. Nejjednodušší demonstraci této problematiky lze provést na klasické představě trhliny eliptického tvaru o rozměrech $2a \times 2b$ jako je na obrázku A-2 [6, 39].

Napětí v bodě A má podle pana Inglise velikost [6, 39]:

$$\sigma_A = \sigma \left(1 + \frac{2a}{b}\right), \text{ rovnice (A7)}$$

a – hlavní poloosa (m)

b – vedlejší poloosa (m)

Předpokládejme ostrou trhlinu, tedy hlavní poloosa je mnohem větší než vedlejší poloosa:

$$a \gg b$$

$$a \gg \rho$$

Poloměr křivosti trhliny ρ zavedeme [6, 39]:

$$\rho = \frac{b^2}{a}, \text{ rovnice (A8)}$$

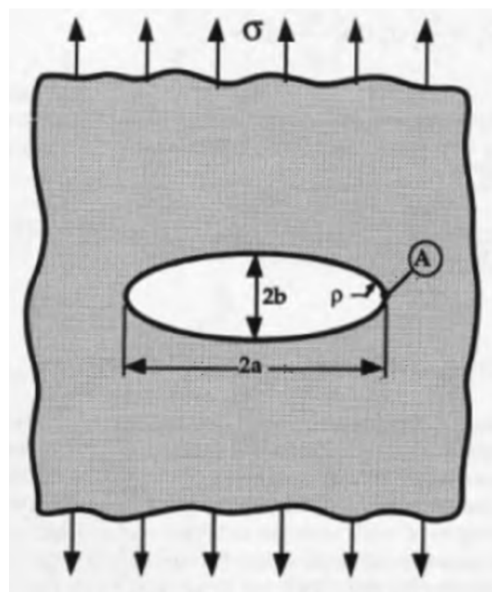
Pak napětí v bodě A bude vypadat [6, 39]:

$$\sigma_A = \sigma \left(1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}}\right), \text{ rovnice (A9)}$$

V souladu s předchozími předpoklady ($a \gg b$, $a \gg \rho$) lze jedničku v závorce zanedbat, napětí v bodě A bude mít velikost [6, 39]:

$$\sigma_A = 2\sigma \sqrt{\frac{a}{\rho}}, \text{ rovnice (A10)}$$

Problém nastává při aplikaci této rovnice na extrém nekonečně úzké trhliny ($\rho=0$). Při dělení nulou by tedy napětí na vrcholu elipsy vycházelo nekonečně velké. Neboli by podle této teorie i malé namáhání materiálu s ostrou trhlinou mělo způsobit porušení. Praktické poznatky ale pochopitelně toto tvrzení vyvracejí a teoretickými studiemi tento paradox podložil pan Griffith pohledem na lom z hlediska energetické bilance [6, 39].



Obr. A-2: Eliptická trhlina v ploché desce [6].

A.1 Griffithův model, energetická bilance

První zákon termodynamiky nám říká, že soustava přechází z jednoho stavu do druhého pouze tehdy, když celková energie soustavy klesá. Griffith tuto myšlenku použil na tvorbu lomu následovně: V průběhu křehkého lomu je práce nutná pro porušení vykonána nahromaděnou elastickou energií. Trhlina může vzniknout pouze tehdy, jestliže tento proces způsobí, že celková energie systému zůstane konstantní, nebo se zmenší. Pokud se tedy trhlina zvětší o nepatrnou hodnotu a uvolní se více energie, než bylo potřeba na tvorbu nového povrchu, pak můžeme říci, že trhlina roste. Mezní stav pro vznik trhliny je v okamžiku, kdy se celková energie nemění. Aplikujme tento princip na stěnu zatíženou konstantním namáháním σ . Práce vynaložená na vznik lomové plochy je tedy podle této teorie dodávána z uvolněné elastické energie [6, 39].

$$\frac{dW}{dA} = \frac{dW_{el}}{dA} + \frac{dW_s}{dA} = 0, \text{ rovnice (A11)}$$

W – celková energie systému (J)

W_{el} – elastická energie systému (J)

W_s – energie nutná k vytvoření lomové plochy (J)

A – lomová plocha (m^2), $A=2a \cdot B$

B – tloušťka tělesa (m)

V případě, že práce spojená se vznikem trhliny je vykonána elastickou energií kumulovanou v systému, pak platí [6]:

$$-\frac{dW_{el}}{dA} = \frac{dW_s}{dA}, \text{ rovnice (A12)}$$

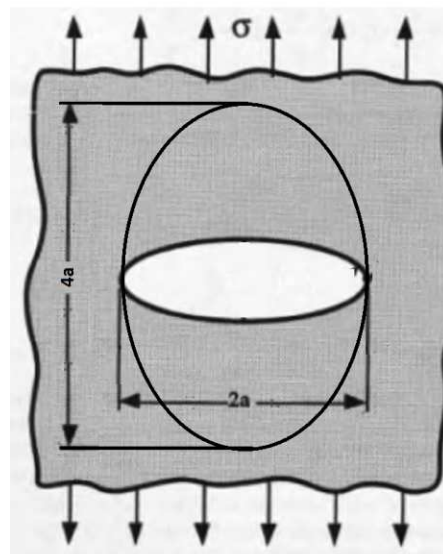
Kde dílčí energie jsou dány vztahy [6]:

$$W_{el} = -\frac{\pi \cdot a^2 \cdot \sigma^2 \cdot B}{E}, \text{ rovnice (A13)}$$

$$W_s = 4 \cdot a \cdot B \cdot \gamma_s, \text{ rovnice (A14)}$$

Dosadíme do rovnice (A12) a dostáváme napětí pro lom („f“ z anglického „fracture“) [6]:

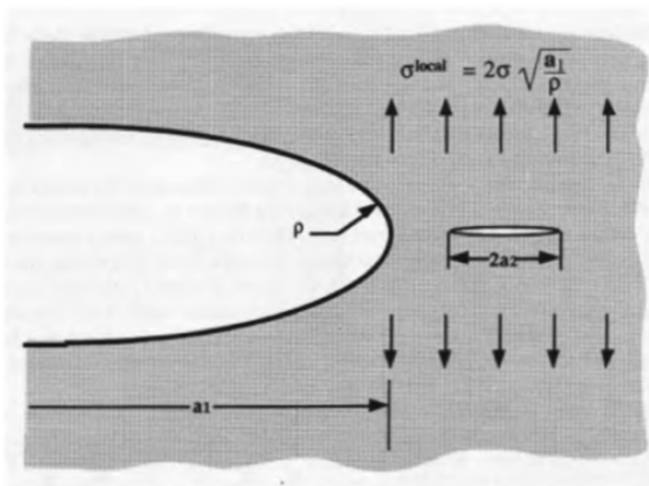
$$\sigma_f = \left(\frac{2E \cdot \gamma_s}{\pi \cdot a} \right)^{1/2}, \text{ rovnice (A15)}$$



Obr. A.1-1: Trhlina podléhající napětí [6].

Srovnání Griffithova modelu s Inglisovým modelem lokální koncentrace napětí.

Mezi rovnicemi obou modelů je jistá podobnost. Při bližším rozboru zmíněných modelů lze vyvodit shodnost předpovědí lomového napětí pro případ ostré trhliny v křehkém tělese. Podobnost neplatí, pokud je poloměr křivosti kořene trhliny mnohem větší než meziatomová vzdálenost. Griffithův model tento parametr nebere v úvahu. Inglisův model zase uvažuje vliv poloměru křivosti jako člen s exponentem $-1/2$. Dosazením rozměru trhliny p v řádu jednotek mikrometrů (v souladu s předpokladem, že musí být mnohem větší než meziatomární vzdálenost) se dostaneme k řádově odlišným výsledkům. Lomové napětí sice závisí na poloměru křivosti kořene trhliny, ale ne tak citlivě jako v modelu lokální koncentrace napětí [6].



Obr. A.1-1.1: Ostrá mikrotrhlina u kořene makroskopické trhliny [6].

Tento zdánlivý nesoulad se dá vysvětlit pohledem na lom jako proces nukleace a růstu. K lomu dochází, pokud nominální napětí i velikost trhliny splňují Griffithovo energetické kritérium, jinými slovy pokud existuje dostatečný termodynamický podmět k růstu trhliny, ale trhlina musí být nejdříve nukleována. Jde o podobný případ, jaký známe z fyziky: Voda tuhne při 0°C, ale

v případě potlačení nukleace můžeme podchladit vodu o více než 10°C. K nukleaci trhliny dochází různými způsoby. Jeden z příkladů ilustruje obr. A.1.1-1. Makroskopická trhlina vlevo zvětšuje napětí v okolí mikrotrhliny vpravo, která se začne šířit, když je splněna Griffithova rovnice. Mikrotrhlina se spojí s velkým defektem, který se šíří, jestliže je splněno globálně Griffithovo kritérium (toto se děje při šíření štěpné trhliny ve feritu) [6].

Modifikovaná Griffithova rovnice

Griffithova teorie tedy platí pouze pro dokonale křehké těleso. Pro kovy je však skutečná pevnost materiálu s tlínou mnohem vyšší než Griffith předpovídá. Tento nedostatek byl odstraněn pozdější modifikací jeho rovnice pro potřeby materiálů schopných se plasticky deformovat. Následující vztah formuloval Irwin [6]:

$$\sigma_f = \left(\frac{2E(\gamma_s + \gamma_p)}{\pi \cdot a} \right)^{1/2}, \text{ rovnice (A16)}$$

γ_p – plastická práce nutná k vytvoření lomové plochy ($\gamma_p \gg \gamma_s$)

Zavedením w_f , neboli energie porušených vazeb na jednotku plochy [6]:

$$w_f = \gamma_s, \text{ rovnice (A17)}$$

Při šíření trhliny kovem dochází k pohybu dislokací v okolí čela trhliny a spotřebovaná energie je [6]:

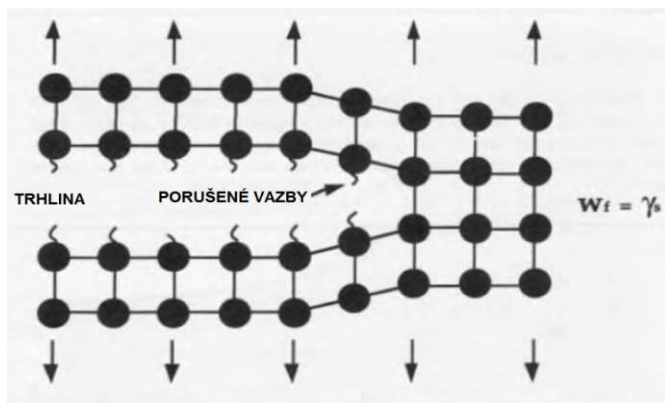
$$w_f = \gamma_s + \gamma_p, \text{ rovnice (A18)}$$

K nárůstu energie také vede rozvětvení a zakřívování trhliny [6]:

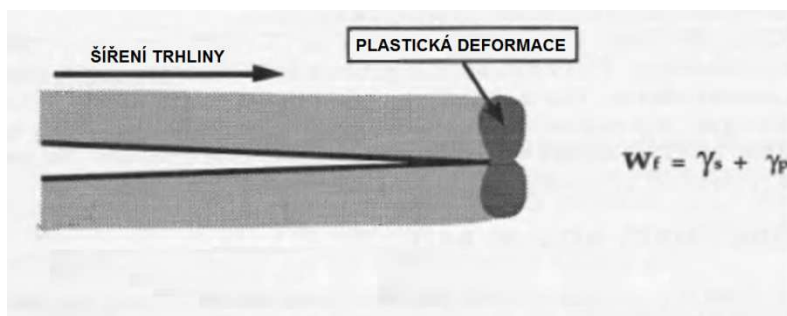
$$w_f = \gamma_s \left(\frac{\text{skutečků plocha}}{\text{promitnuta plocha}} \right), \text{ rovnice (A19)}$$

Griffithův vztah tak s uvažováním disipace energie vypadá následovně [6]:

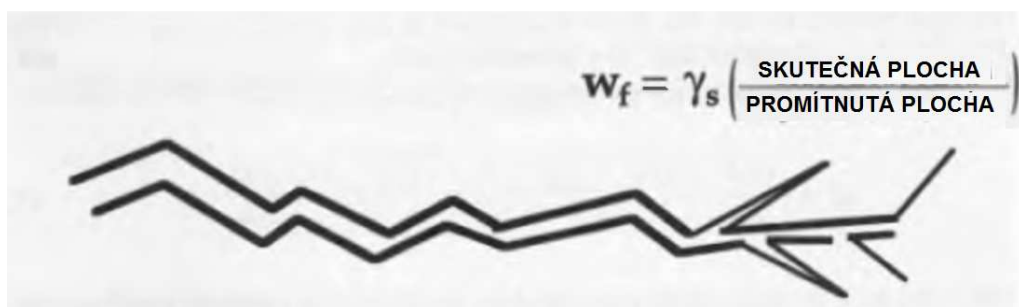
$$\sigma_f = \left(\frac{2 \cdot E \cdot w_f}{\pi \cdot a} \right)^{1/2}, \text{ rovnice (A20)}$$



Obr. A.1-2(a): Růst trhliny v ideálně křehkém materiálu [6].



Obr. A.1-2(b): Růst trhliny v kvazikřehkém elasticko-plastickém materiálu [6].



Obr. A.1-2(c): Růst trhliny, větvení trhliny [6].

Rychlost uvolňování energie (hnací síla trhliny)

Irwin také do Griffithova modelu zavedl veličinu G (hnací síla trhliny). Veličina G reprezentuje rychlost uvolňování energie potřebnou k růstu trhliny [6]:

$$G = -\frac{dW_{el}}{dA} \text{ rovnice (A21),}$$

Podle Griffithovy teorie platí (po dosazení za W_{el} a dA a zkrácením)[6]:

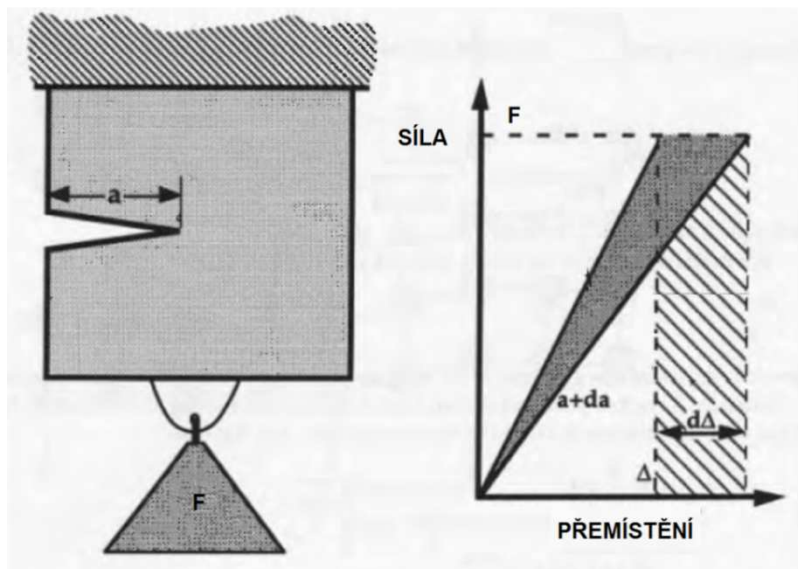
$$G = \frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot a}{E}, \text{ rovnice (A22)}$$

K šíření trhliny dojde při kritické hodnotě [6]:

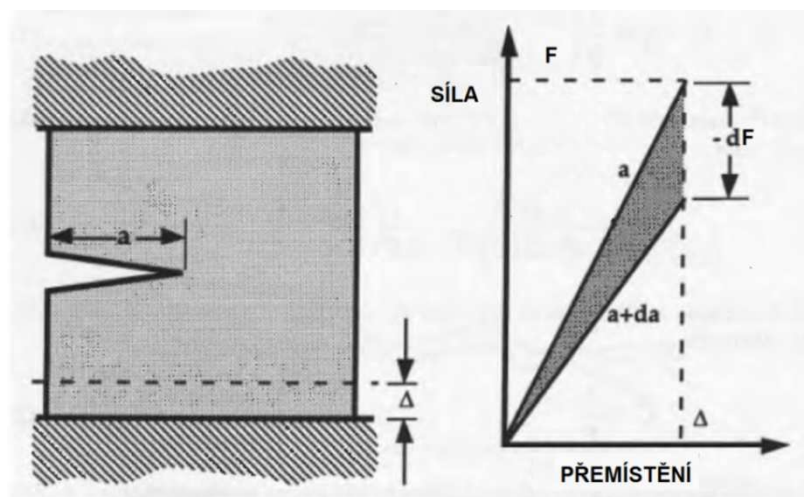
$$G_c = \frac{dW_s}{dA} = 2 \cdot w_f = R, \text{ rovnice (A23)}$$

Veličina G_c , vyjádřená vztahem výše, se označuje jako **lomová houževnatost materiálu**. Pokud G_c závisí na délce trhliny, říká se jí **odpor materiálu R** . Tato veličina je nezávislá na podmínkách

zatěžování. Rozlišujeme dva extrémní druhy zatížení: Zatížení konstantní silou a zatížení při konstantním přemístění, graficky jsou znázorněny na obrázku A.1.-3 [6]:



Obr. A.1-3(a): Zatížení konstantní silou [6].



Obr. A.1-3(b): Zatížení při konstantním přemístění [6].

Celková energie systému je [6]:

$$W = W_{el} - W_F, \text{ rovnice (A24)}$$

Zavedme následující veličiny [6]:

F – síla (N)

Δ – přemístění síly (m)

a – délka trhliny (m)

C – poddajnost ($\text{m} \cdot \text{N}^{-1}$), $C = \frac{\Delta}{F}$, rovnice (A25)

W_{el} - deformační energie uložena v tělese [6]:

$$W_{el} = \int_0^{\Delta} F d\Delta = \frac{1}{2} F \Delta, \text{ rovnice (A26)}$$

W_F - energie spojená s prací vnějších sil [6]:

$$W_F = F \cdot \Delta, \text{ rovnice (A27)}$$

Protože B je konstantní tloušťka, můžeme psát [6]:

$$\frac{dW}{dA} = \frac{1}{B} \left(\frac{dW}{da} \right), \text{ rovnice (A28)}$$

$F = \text{konst.}$, $W = W_{el} - W_F$ [6]:

$$G = -\frac{1}{B} \frac{dW}{da} = \frac{1}{B} \frac{d}{da} (W_F - W_{el}) = \frac{1}{B} \frac{d}{da} \left(F^2 C - \frac{1}{2} F^2 C \right)_{F=\text{konst}}, \text{ rovnice (A29)}$$

$$G = \frac{1}{B} \left[F^2 \frac{dC}{da} - \frac{1}{2} F^2 \frac{dC}{da} \right]_{F=\text{konst}} = \frac{1}{2B} F^2 \left(\frac{dC}{da} \right)_{F=\text{konst}}$$

$W_F = 0$, $\Delta = \text{konstanta}$ [6]:

$$G = \frac{1}{B} \frac{d}{da} (0 - W_{el}) = -\frac{1}{B} \left[\frac{d}{da} \left(\frac{1}{2} F \Delta \right) \right]_{\Delta=\text{konst}} = -\frac{1}{B} \left[\frac{1}{da} \left(\frac{1}{2} F^2 C \right) \right]_{\Delta=\text{konst}} = -\frac{1}{2B} F^2 \left(\frac{dC}{da} \right)_{\Delta=\text{konst}}, \text{ rovnice (30)}$$

Hnací síla trhliny pro oba typy zatěžování je tedy stejně velká:

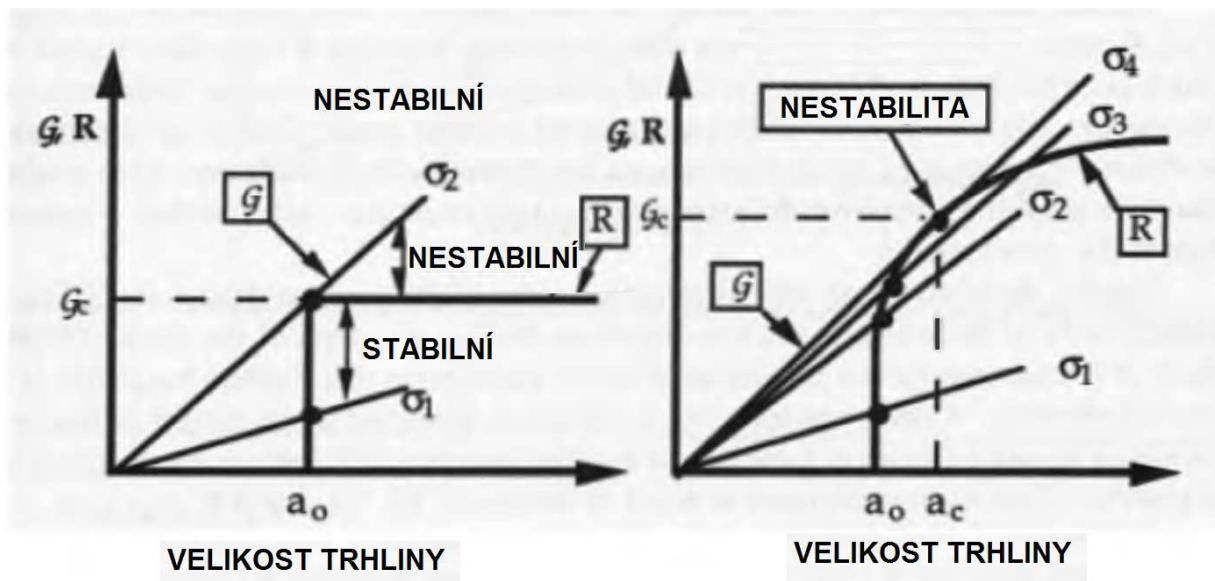
$$\left(\frac{dW_{el}}{da} \right)_{F=\text{konst}} = - \left(\frac{dW_{el}}{da} \right)_{\Delta=\text{konst}}, \text{ rovnice (A31)}$$

Stabilní a nestabilní šíření trhliny, R–křivka

Při dosažení kritické hodnoty $G_c = 2w_f$ tedy dochází k iniciaci trhliny. Šíření trhliny může probíhat podle dvou základních schémat. Růst trhliny je buďto **stabilní** (trhlina se nešíří, pokud zatěžující síla neroste). Nebo je růst trhliny **nestabilní** (trhlina se šíří samovolně, růst síly není nutný). O typu růstu trhliny rozhoduje závislost G a $2w_f$ na délce trhliny a . V případech, kdy se hodnotí závislost G_c na délce trhliny, se často označuje jako **odpor materiálu vůči šíření trhliny R**. Grafická závislost R na délce trhliny se nazývá **křivka odporu** nebo **R–křivka** [6].

Pro popis šíření trhliny na obr. A.1-4 uvažujme průchozí trhlinu velikosti $2a$ v nekonečně široké desce. Hnací síla trhliny je pak podle rovnice (A22) [6]:

$$G = \frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot a}{E}, \text{ rovnice (A22)}$$



Obr. A.1-4(a): Plochá R-křivka.

Obr. A.1-4(b): Stoupající R křivka.

Obr. A.1-4(a) $R \neq f(a)$

Materiál s plochou R-křivkou.

Lom nastává při $G \equiv R$. Odpor R na délce trhliny nezávisí, hnací síla roste s rostoucí trhlinou, šíření lomu je tedy nestabilní. Pro plochou R-křivku je G_c jednoznačně určena.

Obr. A.1-4(b) $R = f(a)$

Materiál s proměnnou R-křivkou. Pro rostoucí R-křivku není G_c není jednoznačně definována.

σ_1 – trhlina neroste

σ_2 – trhlina roste stabilně, hnací síla trhliny roste pomaleji než odpor materiálu, $G < R$

σ_3 – do této hodnoty pokračuje stabilní růst

σ_4 – hnací síla tvoří tečnu k R-křivce, nad hodnotu napětí σ_4 se trhlina šíří nestabilně

Podmínky pro růst trhliny [6]:

- Stabilní růst trhliny

$$G = R; \frac{dG}{da} < \frac{dR}{da}$$

- Nestabilní růst trhliny

$$G = R; \frac{dG}{da} \geq \frac{dR}{da}$$

Rozhraním mezi stabilním a nestabilním šířením lomu je stav, kdy křivka hnací síly G tvoří tečnu k R-křivce.

Představa tělesa s trhlinou jako dvoukonzolový nosník

Z mechaniky známe [6, 41]:

Velikost průhybu:

$$\frac{\Delta}{2} = \frac{F \cdot a^3}{3E \cdot I}, \text{ rovnice (A33)}$$

Moment setrvačnosti:

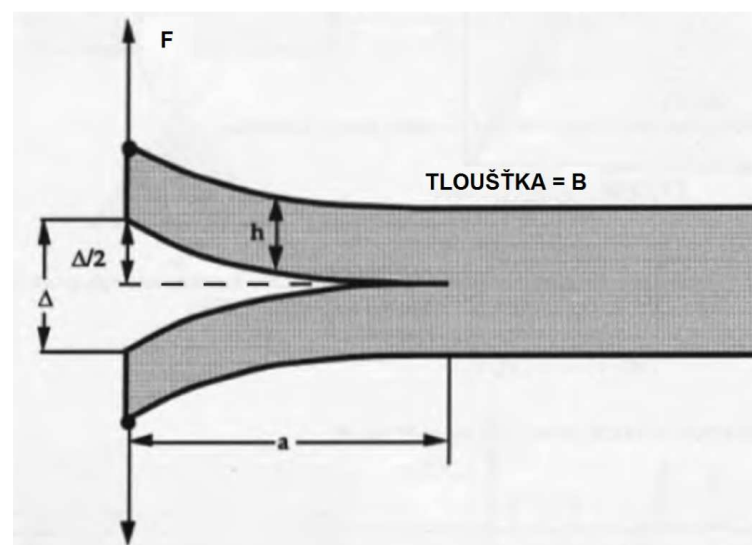
$$I = \frac{B \cdot h^3}{12}, \text{ rovnice (A34)}$$

B – tloušťka (m)

h – výška (m)

Poddajnost:

$$C = \frac{\Delta}{F} = \frac{2a^3}{3EI}, \text{ rovnice (A35)}$$



Obr. A.1-5: Dvoukonzolový nosník [6].

Dříve zmíněnou rovnici (A29, A30) upravíme [6]:

$$G = \frac{F^2}{2B} \frac{dC}{da} = \frac{F^2}{2B} \frac{2 \cdot 3 \cdot a^2}{3EI} = \frac{12 \cdot F^2 \cdot a^2}{B^2 h^3 E}, \text{ rovnice (A36)}$$

Tedy v tomto případě platí:

$$G \approx f(a^2)$$

Hodnota G pro iniciaci lomu se v praxi stanovuje smluvně, protože se velice těžko měří, obdobně jako je tomu u smluvní meze kluzu při zkoušce tahem.

A.2 Irwin, napěťová analýza okolí trhliny

Určení hnací síly trhliny G v nějaké konkrétní součásti je velmi obtížně proveditelné. Praktičtější pohled na věc zavedl Irwin, a to za pomoci analýzy napjatosti na čele trhliny. Vztah popisující napjatost v tělese z izotropního lineárně elastického materiálu v polárních souřadnicích (obr. A.2-1) vypadá následovně [6, 40]:

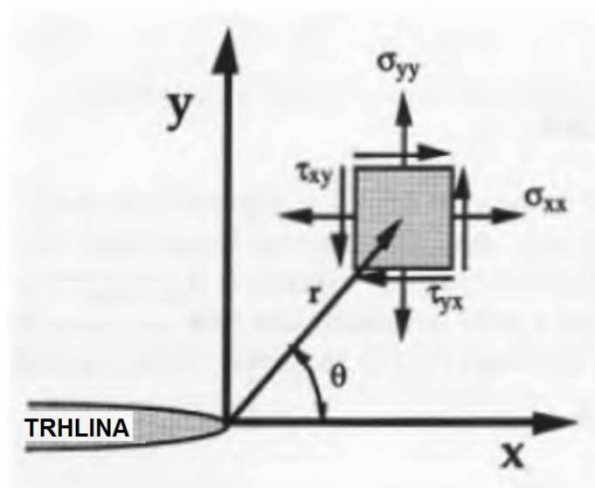
$$\sigma_{ij} = \left(\frac{k}{\sqrt{r}} \right) \cdot f_{ij}(\theta) + \sum_{m=0}^{\infty} A_m \cdot r^{\frac{m}{2}} \cdot g_{ij}^{(m)}(\theta), \text{ rovnice (A37)}$$

r, θ – polární souřadnice (m, rad)

σ_{ij} – složky tenzoru napětí (Pa)

k – konstanta napětí (N.m^{-3/2} se nepoužívá, častěji N.mm^{-3/2})

f_{ij}(θ), g_{ij}(θ) – jsou bezrozměrné veličiny

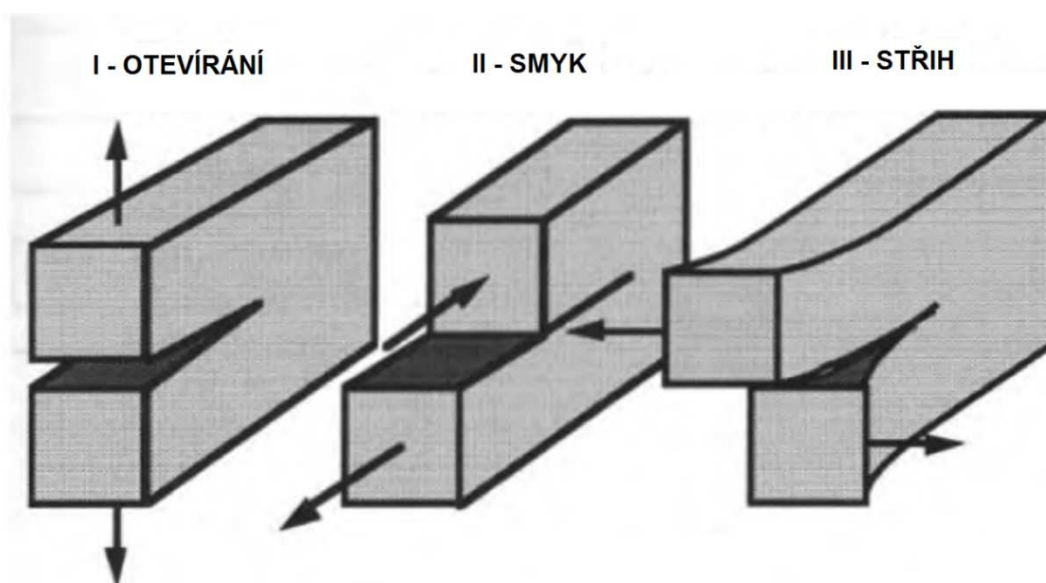


Obr. A.2-1: Definice souřadných os před kořenem trhliny, osa Z je kolmá na stránku [6].

Řešení tenzorů není předmětem této práce, proto jsou ocitovány jen závěry, které uvádí Anderson [6]. Všechna řešení obsahují první člen úměrný $1/\sqrt{r}$. Tento člen vyjadřuje singularitu napětí v okolí čela trhliny (při hodnotě r blížící se nule roste první člen řešení nade všechny meze). Ostatní členy mají konečnou hodnotu závislou na geometrii tělesa. To vede k závěru, že v blízkosti trhliny rozhoduje o velikosti napětí pouze první člen.

Součinitel (faktor) intenzity napětí K

Konstanta k a funkce $f_{ij}(\theta)$ z rovnice (A37) závisí na způsobu (režimu) zatěžování. Tyto režimy zatěžování trhliny jsou znázorněny na obrázku A.2-2. Místo k se v praxi zavádí konstanta $K = k\sqrt{2\pi}$, nazývá se **součinitel (faktor) intenzity napětí** a bývá indexován podle způsobu zatěžování K_I , K_{II} , K_{III} (indexy viz obr. A.2-2). Faktor intenzity napětí K zcela určuje průběh napětí v oblasti čela trhliny. Pokud známe hodnotu K , můžeme určit složky napětí a posunutí jako funkci θ a r [6, 39, 40].



Obr. A.2-2: Tři režimy zatěžující trhlínu [6].

Napěťová pole před čelem trhliny v isotropním, lineárně elastickém materiálu vypadají po dosazení veličiny K následovně [6, 39, 40]:

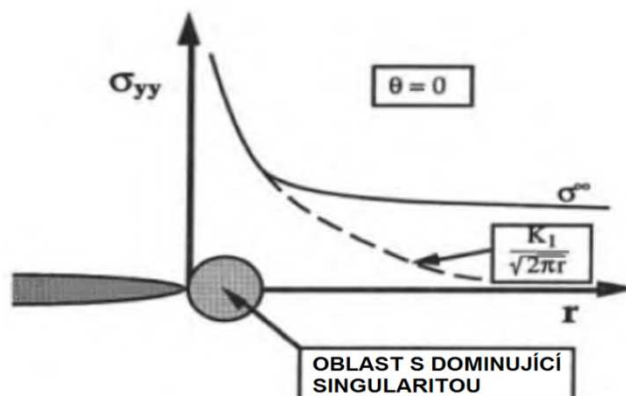
$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^I = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi \cdot r}} f_{ij}^I(\theta) \quad , \text{ rovnice (A38)}$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{II} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi \cdot r}} f_{ij}^{II}(\theta) \quad , \text{ rovnice (A39)}$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{III} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi \cdot r}} f_{ij}^{III}(\theta) \quad , \text{ rovnice (A40)}$$

Podrobné výrazy pro složky napětí a posunutí jsou uvedeny v tabulkách A1, A2, A3. Uvažujme způsob zatěžování I v rovině trhliny ($\theta = 0$). Napětí z tabulky A1 ve směrech x a y jsou pak rovna [6]:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \quad , \quad \tau_{xy} = 0, \text{ rovnice (A41)}$$



Obr. A.2-3: Napětí kolmé k rovině trhliny v režimu zatěžování I.

Rovina trhliny je tedy hlavní rovina pro režim zatěžování I. Na obrázku A.2-3 je schematicky zobrazen průběh napětí σ_{yy} (napětí kolmé na rovinu trhliny). Rovnice (A41) platí pouze v blízkosti čela trhliny (dominující singularita $1/\sqrt{r}$). Napětí více vzdálené čelu trhliny je určeno vzdálenými okrajovými podmínkami.

Tabulka A1:

Napěťová pole před kořenem trhliny pro režim I a režim II v lineárním elastickém isotropním mat. .

	Režim I	Režim II
σ_{xx}	$\frac{K_I}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right]$	$-\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[2 + \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right]$
σ_{yy}	$\frac{K_I}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right]$	$\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)$
τ_{xy}	$\frac{K_I}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right)$	$\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right]$
σ_{zz}	0 (rovinná napjatost) $\mu (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$ (rovinná deformace)	0 (rovinná napjatost) $\mu (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$ (rovinná deformace)
τ_{xz} τ_{yz}	0	0

μ – Poissonův poměr (1)

Tabulka A2:

Pole posunutí kořene trhliny pro režim I a režim II v lineárním elastickém isotropním materiálu.

	Režim I	Režim II
u_x	$\frac{K_I}{2G'} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa - 1 + 2 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]$	$\frac{K_{II}}{2G'} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa + 1 + 2 \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]$
u_y	$\frac{K_I}{2G'} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa + 1 - 2 \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]$	$-\frac{K_{II}}{2G'} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\kappa - 1 - 2 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]$

G' – modul pružnosti ve smyku (Pa)

κ – Poissonova konstanta (1)

$\kappa = 3-4\mu$ (rovinná deformace)

$\kappa = (3-\mu) / (1+\mu)$ (rovinné namáhání)

Tabulka A3:

Nenulové složky napětí a posunutí pro režim III v lineárním elastickém isotropním materiálu.

$\tau_{xz} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$
$\tau_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi \cdot r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$
$u_z = -\frac{K_{III}}{G'} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$

Vztah mezi K a globálními vlastnostmi součásti

Faktor intenzity napětí K se určuje různým způsobem. Pro jednoduchá tělesa se odvozuje, pro složitá se určuje numericky či experimentálně. Uvažujme základní konfiguraci z obrázku A.2-4 (průchozí trhlina v nekonečné stěně, napětí σ kolmé na rovinu trhliny, způsob zatěžování I). Stále se předpokládá izotropní lineárně elastický materiál, napětí ve všech místech tedy roste úměrně k působícímu napětí σ , včetně okolí čela trhliny a tedy $K_I \approx \sigma$ [6].

Podle rovnice (A38) byl určen vztah [6]:

$$K_I = Y(\sigma \sqrt{a \cdot \pi}), \text{ rovnice (A43)}$$

Y – koeficient tvaru a velikosti trhliny a geometrie vzorku, korekční funkce (1)

σ – vztahné napětí (Pa), vztahné napětí je obvykle definováno jako maximální napětí v místě (v řezu) neporušeného tělesa, kde se nachází trhlina.

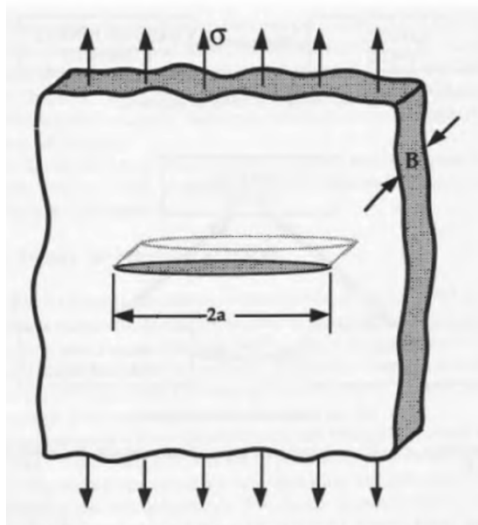
Konkrétní vztah pro geometrii na obrázku A.2-4 je [6]:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi \cdot a}, \text{ rovnice (A44)}$$

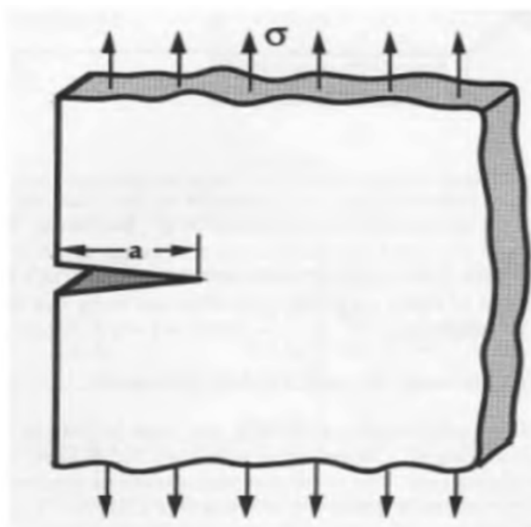
Pro polonekonečnou stěnu na obrázku A.2-5 platí [6]:

$$K_I = 1,12 \sigma \sqrt{\pi \cdot a}, \text{ rovnice (A45)}$$

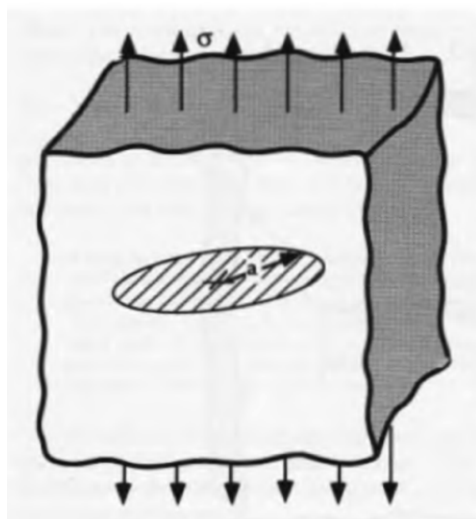
Hodnota K_I pro povrchové trhliny je o 12 % vyšší. Povrchové trhliny jsou tedy nebezpečnější než vnitřní.



Obr. A.2-4: Průchozí trhlina v nekonečné desce [6].



Obr. A.2-5: Trhlina na okraji v polonekonečné desce [6].

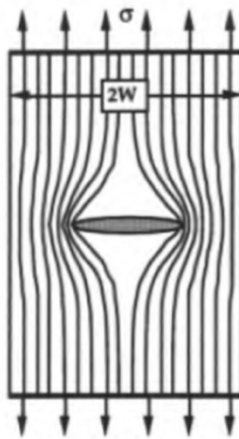
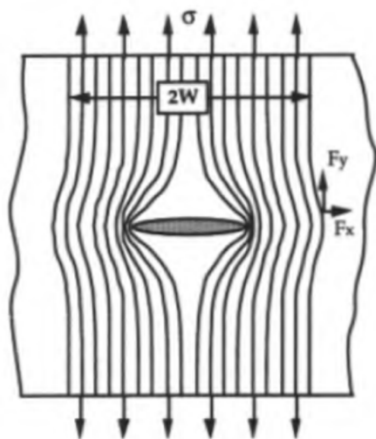


Pro neprůchozí trhlinu platí [6]:

$$K_I = \frac{2}{\pi} \sigma \sqrt{\pi \cdot a}, \text{ rovnice (A46)}$$

Obr. A.2-6: Neprůchozí trhlina [6].

Vliv konečné velikosti tělesa na K



Předchozí napěťová analýza se vždy týkala takzvané nekonečné stěny, kdy je rozměr trhliny zanedbatelný v porovnání s rozměry tělesa. Ve skutečnosti tento zjednodušující předpoklad vždy aplikovat nelze.

Obr. A.2-7: Vliv koncentrace napětí na desku konečné a nekonečné velikosti [6].

V nekonečně velké stěně (obr. A.2-7 vlevo) jsou složky sil F_x a F_y ve vzdálenosti W od středu trhliny nenulové. V případě, že je šířka omezena, musí složka síly F_x být nulová. Na kořeni trhliny je tedy větší koncentrace napětí. Metod řešení tohoto jevu je více. Jednou z nich je metoda modelování řady trhlínek ležících v nekonečné stěně [6]:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \left[\frac{2W}{\pi \cdot a} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi \cdot a}{2W} \right) \right]^{1/2}, \text{ rovnice (A47)}$$

Přesnější tvar rovnice výše [6]:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \left[\sec \left(\frac{\pi \cdot a}{2W} \right) \right]^{1/2} \left[1 - 0,025 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 0,06 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right], \text{ rovnice (A48)}$$

Vztah mezi faktorem intenzity napětí K_I a hnací silou trhliny G

Jednoznačný důkaz o souvislosti mezi veličinami K_I a G poprvé odvodil Irwin. Pro lineárně elastický materiál jsou oba parametry v jednoznačném vztahu. Například pro průchozí trhlinu v nekonečné stěně zatěžovanou rovnoměrným tahovým napětím platí:

Známe vztahy pro hnací sílu trhliny a faktor intenzity napětí (rovnice (A22, A44)):

$$G = \frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot a}{E}, \text{ rovnice (A22)}$$

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi \cdot a}, \text{ rovnice (A44)}$$

G a K_I jsou ve vztahu [6]:

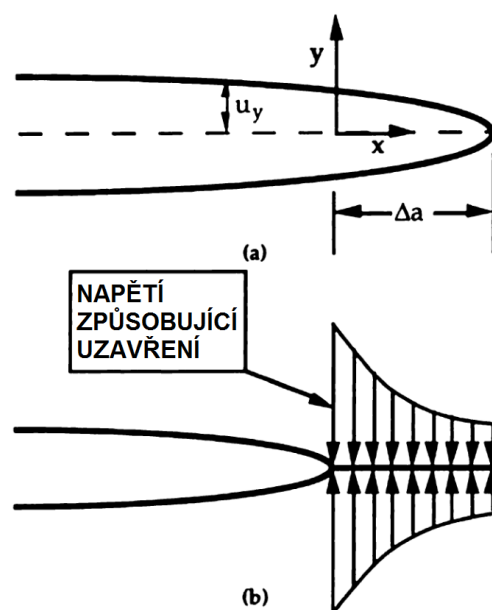
$$G = \frac{K_I^2}{E}, \text{ rovnice (A51)}$$

Pro podmínky rovinné deformace platí [6]:

$$E' = \frac{E}{1 - \mu^2}, \text{ rovnice (A52)}$$

Pro podmínky rovinného namáhání platí [6]:

$$E' = E, \text{ rovnice (A53)}$$



Obr. A.2-8: Zatěžování uzavíracím napětím [6].

Rovnice (A51) platí pouze pro průchozí trhlinu v nekonečné stěně. Důkaz o obecné platnosti je následující: Uvažujme trhlinu o počáteční délce $a + \Delta a$ zatíženou podle obrázku A.2-8. Přidejme tlakové napětí v mezích $x=0$ až $x=\Delta a$ tak, že dojde k zavření trhliny. Práce nutná k uzavření konce trhliny je v závislosti k hnací síle trhliny [6]:

$$G = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta U}{\Delta a} \right), \text{ rovnice (54)}$$

ΔU – práce nutná k uzavření trhliny, je rovna součtu prací vykonaných v rozmezí od $x = 0$ do $x = \Delta a$:

$$\Delta U = \int_{x=0}^{x=\Delta a} dU(x), \text{ rovnice (55)}$$

Což je plocha pod křivkou závislosti síla – přemístění [6]:

$$dU(x) = 2 \cdot \frac{1}{2} F_y(x) \cdot u_y(x) = \sigma_{yy}(x) u_y(x) dx, \text{ rovnice (A56)}$$

Vztahy pro $\sigma_{yy}(x)$ a $u_y(x)$ jsou z tabulky A1, podle předpokladů uvažujeme $\theta = 0$ a platí [6]:

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi \cdot x}}, \text{ rovnice (A57)}$$

$$u_y = \frac{2(1-\mu)}{G'} K_I \left(\frac{x}{2\pi} \right)^{1/2}, \text{ rovnice (A58)}$$

μ – Poissonův poměr (1)

G' – modul pružnosti ve smyku (Pa)

Po dosazení do rovnice (A54) a úpravě vznikne vztah dokazující jednoznačnou souvislost mezi veličinami K_I a G [6]:

$$G = \frac{1-\mu}{2G'} K_I^2 = \frac{1-\mu^2}{E} K_I^2, \text{ rovnice (A59)}$$

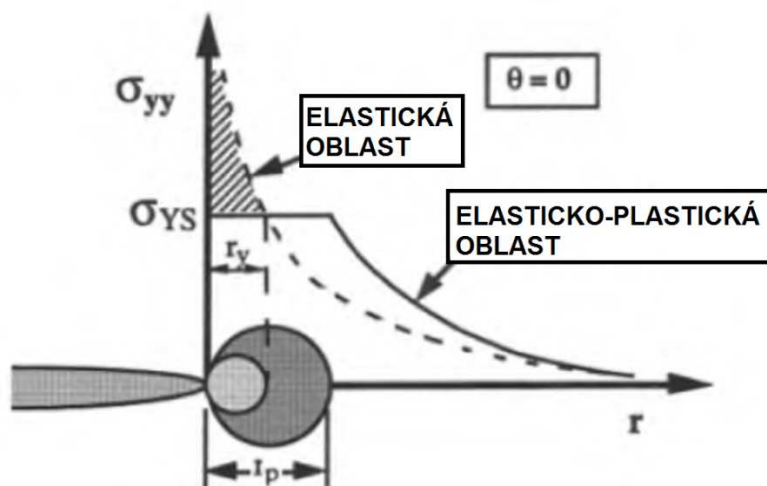
Vliv plastické deformace na napjatost na čele trhliny

Napětí v oblastech blízkých špičce trhliny (r blíží se nule) mohou být velmi vysoká. Materiály jako kovy nejsou schopny takovát napětí přenést a v okolí čela trhliny dochází k relaxaci napětí (vzniká zde plastická oblast). Uvažujme rovinné namáhání. V rovině trhliny ($\theta = 0$) má napětí σ_{yy} průběh dle rovnice (A41). Předpokládejme, že ke vzniku plastické deformace dojde v okolí čela až do vzdálenosti, kde je napětí rovno [6]:

$$\sigma_{yy} = R_e = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r_y}}, \text{ rovnice (A60)}$$

Poloměr plastické zóny je z předcházející rovnice [6]:

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{R_e} \right)^2, \text{ rovnice (A61)}$$



Obr. A.2-9: Odhady velikosti plastické zóny [6].

$\sigma_{YS} = R_e = \text{mez kluzu (Pa)}$

Takovýto výpočet založený na elastickém řešení obsahuje zásadní nedostatek. Pokud dojde k deformaci, musí dojít k přerozdělení napětí tak, aby byly splněny podmínky rovnováhy. Plastická zóna musí vzrůst na velikost, při které jsou tyto síly vyrovnány. Odhad plastické zóny r_p může vypadat následovně [6]:

$$R_e \cdot r_p = \int_0^{r_p} \left(\frac{K_I}{\sqrt{2\pi \cdot r_p}} \right) dr, \text{ rovnice (A62)}$$

Po integraci a úpravě [6]:

$$r_p = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_I}{R_e} \right)^2, \text{ rovnice (A63)}$$

Tato hodnota je dvakrát větší než při jednoduchém výpočtu založeném pouze na elastickém řešení.

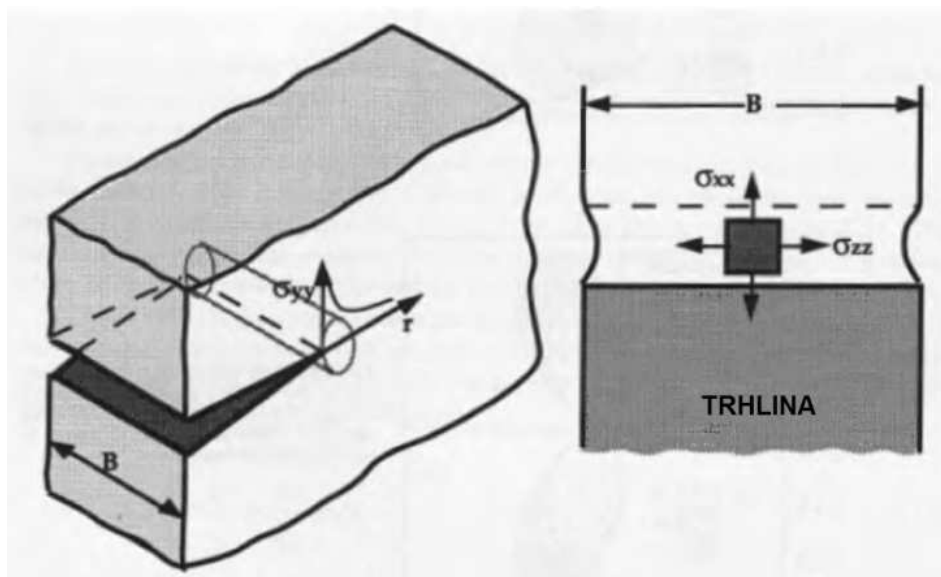
V podmínkách rovinné deformace je plastická deformace potlačena trojosým stavem napjatosti. Rozměr plastické zóny je pak menší:

$$r_y = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_I}{R_e} \right)^2, \text{ rovnice (A64)}$$

Podmínky rovinné napjatosti, rovinné deformace

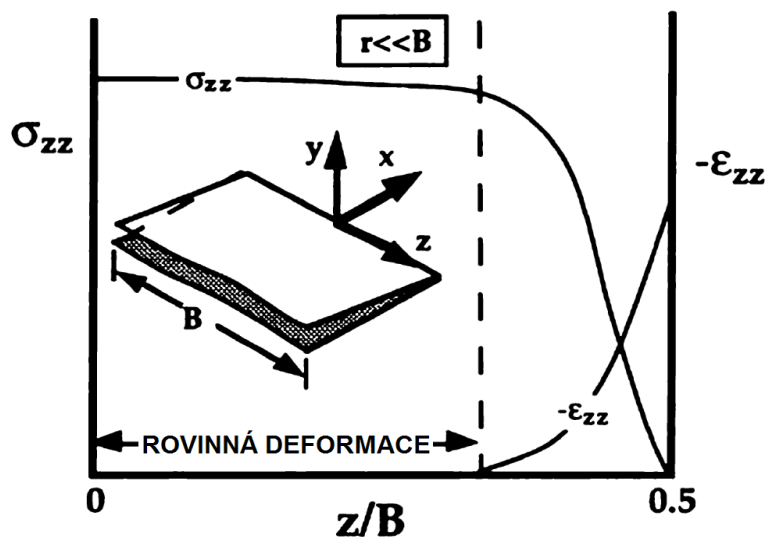
Podmínky rovinné napjatosti (RN) nastávají, pokud je jedno ze tří hlavních napětí nulové. Podmínky rovinné deformace (RD) nastávají v situaci, kdy okolní materiál nedovolí příčnou kontrakci a tím vzniká velké napětí napříč tloušťkou.

Podmínky v okolí čela trhliny v obecném případě neodpovídají rovinné napjatosti nebo rovinné deformaci, jsou prostorové. Díky velkému napětí kolmému k rovině trhliny ($\sigma \equiv \sigma_{yy}$), se snaží materiál kontrahovat ve směru osy X a Z (obr. A.2-10, A.2-11), ale okolní materiál mu v tom brání, a to způsobuje trojosou napjatost v oblasti kořene trhliny [6].



Obr. A.2-10: Prostorová deformace na kořenu trhliny [6].

Uvažujme desku s trhlinou na obrázku A.2-10. Předpokládejme, že plastická zóna je malá. Kdyby v desce nebyla trhlina, tak by byla ve stavu rovinné napjatosti. Proto také oblasti dostatečně vzdálené od kořene trhliny můžeme považovat za zatížené rovinným namáháním. Materiál blízko kořene trhliny je namáhán více než okolní oblasti. V případě že je $r \ll B$, pak uvnitř materiálu jsou podmínky rovinné deformace (okolní materiál nedovolí příčnou kontrakci). Materiál na povrchu desky se nachází ve stavu rovinné napjatosti, protože může relaxovat ve směru osy Z a tedy nepůsobí zde žádné napětí kolmé k povrchu [6].



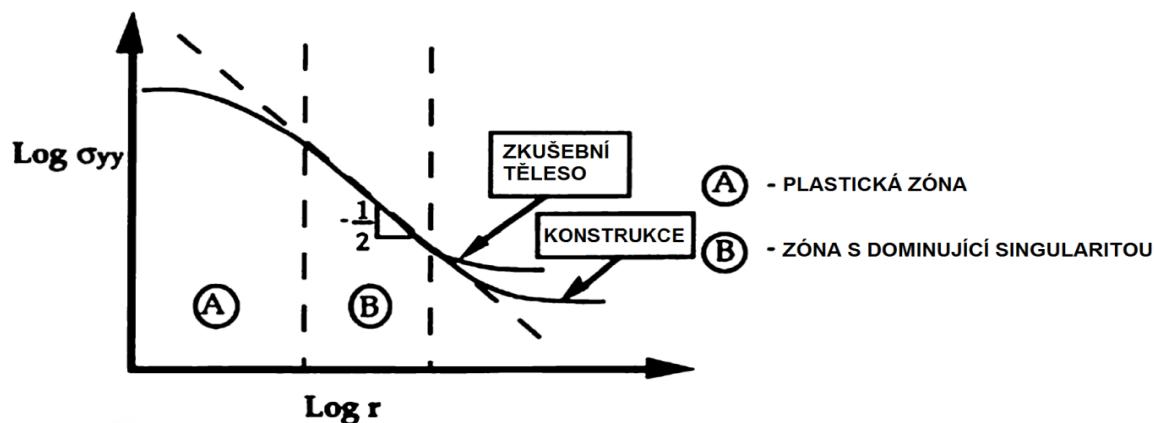
Obr. A.2-11: Schéma závislosti příčného napětí a deformace [6].

Vliv šířky a výšky tělesa na K_I

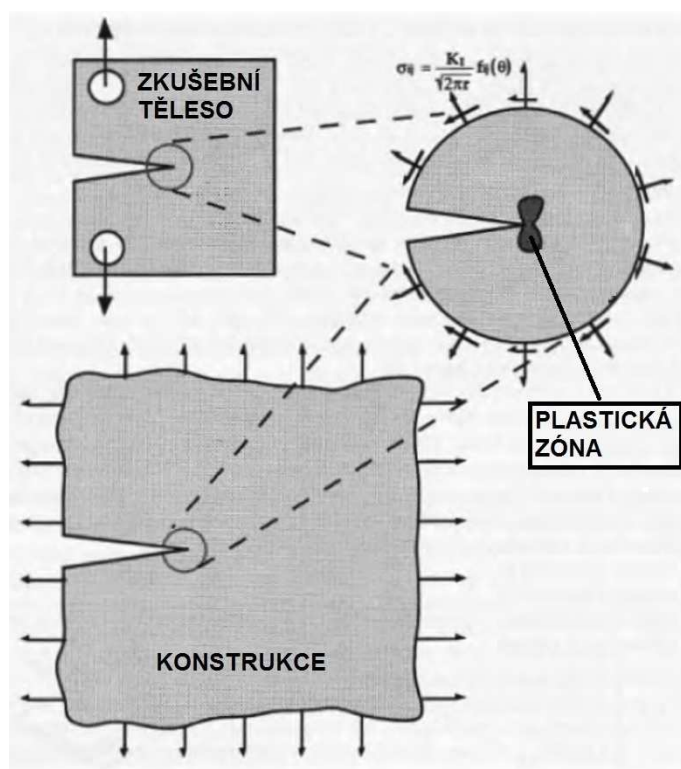
Ze zkušebního vzorku a z konstrukce myšleně vyřízneme oblast, která má střed v kořeni trhliny. Velikost plastické zóny a průběh napětí uvnitř disku jsou funkcí pouze okrajových podmínek a materiálu (podle obrázku A.2-12 udává okrajové podmínky plastické zóny A oblast B, kde dominuje singularita, která je dána hodnotou K_I). Pokud jsou konstrukce i zkušební těleso zatížené stejnou hodnotou K_I , pak jsou podmínky na čele trhliny u obou konfigurací stejné. Při zvyšujícím se zatížení

dojde k lomu při stejné hodnotě K_C jak u zkušební tělesa, tak i u konstrukce (platí pouze za předpokladu malé plastické zóny).

Pokud uvažujeme cyklické namáhání a zatěžujeme stejnou hodnotou ΔK_I (**rozkmít faktorů intenzity napětí**), tak bude i stejná rychlost šíření únavové trhliny. Platí však stejně jako u rovnoměrně vzrůstajícího namáhání, že existuje malá plastická zóna obklopená oblastí s dominující singularitou $1/\sqrt{r}$. V okamžiku lomu platí $K_I \equiv K_C$. Hodnota K_C je **lomová houževnatost**, materiálová vlastnost vyjadřující houževnatost [6].



Obr. A.2-12: Napěťové pole pro zkušební těleso a konstrukci z obrázku A.2-13 [6].

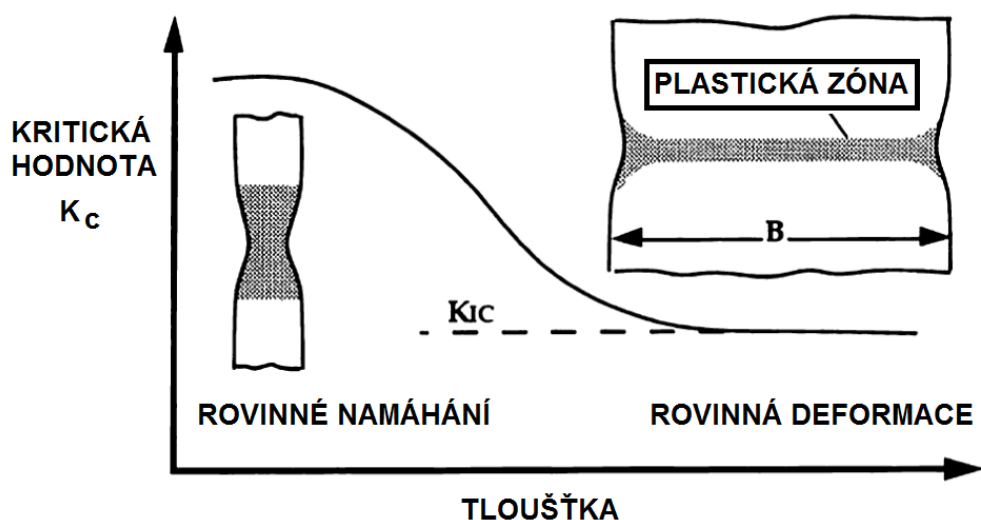


Obr. A.2-13: Schéma zkušební tělesa a konstrukce namáhaných stejným napětím [6].

Vliv tloušťky tělesa na K_I

Okamžik lomu nastane dosažením kritické hodnoty K_C . Pro zajištění objektivity této materiálové mezní hodnoty K_C při mechanických zkouškách musíme zajistit její nezávislost na geometrii součásti, která souvisí s velikostí plastické zóny. Pokud je velikost plastické zóny r_y nepatrná ve srovnání s tloušťkou B , tak na hranici mezi plastickou a elastickou deformací uprostřed tělesa jsou

podmínky přibližně odpovídající rovinné deformaci. Pokud je velikost plastické zóny r_y srovnatelná s tloušťkou B , tak dochází k deformaci ve směru tloušťky a podmínky přibližně odpovídají rovinnému namáhání. Je zde tedy vliv tloušťky B na hodnotu K_c [6].



Obr. A.2-14: Závislost tloušťky na houževnatosti [6].

Omezení platnosti lineárně elastické lomové mechaniky LELM

Platnost LELM je dána existencí oblasti blízké plastické zóně, kde je dominující singularita $1/\sqrt{r}$. Pokud chceme získat platné hodnoty K_{Ic} , je často uváděna nějaká podmínka lomu. Americké normy například tvrdí, že musí platit experimentálně zjištěná podmínka lomu při rovinné deformaci [6]:

$$a, B, (W - a) \geq 2,5 \left(\frac{K_I}{R_e} \right)^2, \text{ rovnice (A65)}$$

a – délka trhliny (m)

B – tloušťka zkušebního tělesa (m)

$(W-a)$ – je rozměr tělesa od konce trhliny k povrchu tělesa ve směru šíření trhliny (m)

Podle rovnice (A64) platí za podmínek rovinné deformace pro velikost plastické zóny [6]:

$$r_y^{RD} = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_I}{R_e} \right)^2, \text{ rovnice (A64)}$$

Dejme do poměru poloměr plastické zóny k tloušťce tělesa s přihlédnutím k rovnici (A65) a získáme jejich poměr pro platnost rovnice (A65) [6]:

$$\frac{r_y}{B} = \frac{\frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_I}{R_e} \right)^2}{2,5 \left(\frac{K_I}{R_e} \right)^2} \cong \frac{1}{50}, \text{ rovnice (A66)}$$

PŘÍLOHA B

Příloha B: Odhad počtu cyklů do lomu

Je známou skutečností, že hranice mezi nízkocyklovou a vysokocyklovou únavou není přesně stanovena a s morfologií těchto únavových lomů je to obdobné. Dílčím cílem této přílohy je aplikovat získané poznatky z lomové mechaniky a hrubě odhadnout počet cyklů od začátku růstu trhliny do vlastního lomu. Hrubě odhadnout v podání této přílohy znamená, že se pohybujeme v oblasti lineárně elastické lomové mechaniky a zjednodušeny jsou i další prvky, které jsou zmíněny přímo ve výpočtu.

B.1 Parisův zákon, použité vztahy

Rychlost růstu trhliny při únavovém zatěžování jako první formuloval Paris a zahrnuje jak vliv materiálu, tak vliv geometrie tělesa. Pracuje tedy s faktorem intenzity napětí K . Základní tvar Parisova zákona je [1, 3, 42, 43]:

$$\frac{da}{dN} = A \cdot (\Delta K)^m, \text{ rovnice (B1)}$$

a – délka trhliny (mm)

N – počet cyklů (1)

A – materiálová konstanta

m – materiálová konstanta

ΔK – rozkmit faktoru intenzity napětí

$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ ($N \cdot \text{mm}^{-3/2} = \text{MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$)

Tabulka B1: Orientační materiálové konstanty Parisovy rovnice [43].

Materiál	m	A
Oceli	3	10^{-11}
Slitiny hliníku	3	10^{-12}
Slitiny niklu	3,3	4×10^{-12}
Slitiny titanu	5	10^{-11}

Faktor intenzity napětí na čele trhliny je dán vztahem [1, 3, 42]:

$$K = Y(\sigma\sqrt{a \cdot \pi}), \text{ rovnice (B2)}$$

Y – korekční funkce (1)

σ – vztažené napětí (MPa) (dosazuje se maximální napětí v místě trhliny, ale v tělese bez trhliny)

a – délka trhliny (mm)

Pro cyklické namáhání pak obdobně [1, 3, 42]:

$$\Delta K = Y(\Delta\sigma\sqrt{a \cdot \pi}), \text{ rovnice (B3)}$$

$\Delta\sigma$ – rozmezí amplitud cyklického namáhání (MPa)

Členy tohoto vztahu (rovnice (B3)) jsou obvykle lehce určitelné, až na Y . Korekční funkce Y se pro geometricky jednoduché situace určují pomocí výpočetní příručky (Stress intensity factors, D.P. Rooke nebo Stress Intensity Factor and Limit Load, S. A. Laham). Pro složitější případy, jako je právě ten náš, se používá výpočetní technika, kdy je možné, například pomocí MKP (metody konečných prvků), zjistit přímo faktor intenzity napětí K a dopočítat korekční funkci Y [42].

Dále už je nutné jen vyjádřit z rovnice (B1) počet cyklů a následně ji upravit [1]:

$$dN = \frac{da}{A \cdot (\Delta K)^m}, \text{ rovnice (B4)}$$

Integrovaná předchozí rovnice [1]:

$$\int_0^{N_f} dN = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{A \cdot (\Delta K)^m}, \text{ rovnice (B5)}$$

N_f – zbývající počet cyklů do lomu (1)

a_c – kritická délka trhliny (mm)

a_0 – počáteční délka trhliny, při které začíná růst únavová trhlina pro dané $\Delta\sigma$ (mm)

Za ΔK lze pak dosadit a konstanty převést před integrál [1, 3, 42]:

$$\int_0^{N_f} dN = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{A \cdot (Y \cdot \Delta\sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a})^m} = \frac{1}{A \cdot \pi^{m/2} (\Delta\sigma)^m} \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{Y^m \cdot a^{m/2}}, \text{ rovnice (B6)}$$

Pro poměrně krátkou trhlinu, lze předpokládat Y nezávislé na délce trhliny a [3]:

$$\int_0^{N_f} dN = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{A(Y \cdot \Delta\sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a})^m} = \frac{1}{A(Y \cdot \Delta\sigma \cdot \sqrt{\pi})^m} \int_{a_0}^{a_c} a^{-m/2} da, \text{ rovnice (B7)}$$

Diferenciální rovnice pak může být řešena pomocí separace proměnných [1, 3, 42]:

$$N_f = \frac{2(a_c^{\frac{2-m}{2}} - a_0^{\frac{2-m}{2}})}{(2-m)A(Y \cdot \Delta\sigma \cdot \sqrt{\pi})^m}, \text{ rovnice (B8)}$$

B.2 Aplikace Parisova zákona

Teorie Parisova vztahu je velice zajímavá, ale v praxi se však volí jiný a jednodušší přístup, tzv. výpočet „step by step“, který probíhá v návazných iteracích. Na počátku každé iterace se volí velikost přírůstku trhliny Δa , následně je počítán počet zátěžných cyklů potřebných pro prodloužení o předem daný přírůstek Δa . Pro každý přírůstek se předpokládá, že hodnota ΔK a tedy i rychlost šíření je konstantní. Je zřejmé, že čím kratší přírůstky budou, tím menší chyby se budeme dopouštět zmíněným průměrováním rychlosti růstu. Obdobné přístupy se využívají také při simulacích růstu únavové trhliny pomocí MKP [42].

Takovýto výpočet bude proveden i v našem případě. S ohledem na relativně krátkou trhlinu budou provedeny 4 iterace. Iniciaci únavové trhliny, podle zjištění fraktografické analýzy hlavní části bakalářské práce, předpokládáme v materiálu trubky.

Vstupní parametry:

Podmínky namáhání nebyly přesně známy, protože se zde velmi pravděpodobně vyskytlo i neznámé přídavné ohybové namáhání (podle otlaku na trubce). Z tohoto důvodu jsou parametry namáhání voleny:

Krouticí moment:

$$M_{\max}=51,2\text{Nm} \quad M_{\min}=0$$

Přídavné ohybové namáhání:

$$F_{\max}=100\text{N} \quad F_{\min}=0$$

Způsob namáhání hřídele je charakterizován orientací vnějších sil ve směru rovnoběžném s čelem předpokládané trhliny. Šíření trhliny je v tomto případě řízeno smykovou složkou napětí. Jedná se tedy o způsob namáhání III.

Pozn.: Přídavný ohyb změny namáhání na kombinované, ale vzhledem k velikosti ohybové síly a nesnadnému určování ekvivalentní houževnatosti pro režim I a III byla tato skutečnost zanedbána a pracuje se pouze s K_{III} , respektive K_{IIIC} .

Houževnatost materiálu při torzním zatížení K_{IIIC} a materiálové konstanty A , m v Parisově rovnici je pro konkrétní materiál velice těžké zjistit, vzhledem k povaze této přílohy byly tedy dosazeny hodnoty pro konstrukční ocel obecně [43, 44, 45, 46, 47]:

$$K_{IIIC} = 7,65 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} = 241,7 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3/2} = 241,7 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$$

$$A = 6 \cdot 10^{-11} \text{ mm}^{1/2} \cdot \text{MPa}^{-1}$$

$$m = 3$$

V okamžiku nestabilního šíření trhliny dosahuje faktor intenzity napětí kritické hodnoty. Kritická délka trhliny je určena právě podle K_{IIIC} :

$$a_c = 1,806 \text{ mm}$$

Původní, iniciační délka trhliny, stanovená podle velikosti vrubu v místě neprovaření kořene svaru:

$$a_0 = 1,5 \text{ mm}$$

Výkmit faktoru intenzity napětí je určen MKP (Autodesk Simulation Multiphysics 2012). Je to rozdíl mezi faktorem intenzity napětí při maximálním a minimálním zatížení:

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$$

Vlastní výpočet:

1. přírůstek trhliny

$$a_0 = 1,5 \text{ mm}, \Sigma N = 0, \Delta a = 0,1 \text{ mm}, \Delta K = 215,1 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3/2}$$

$$\frac{d_a}{d_N} = A \cdot \Delta K^m = 10^{-11} \cdot 215,1^3 = 9,952 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mm}}{\text{cyklus}}$$

$$\Delta N = \frac{\Delta a}{d_a/d_N} = \frac{0,1}{9,952 \cdot 10^{-5}} = 1005 \text{ cyklů} \Rightarrow \sum N = 1005$$

2. přírůstek trhliny

$$a = 1,6 \text{ mm}, \Sigma N = 1005, \Delta a = 0,102 \text{ mm}, \Delta K = 220,2 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3/2}$$

$$\frac{d_a}{d_N} = A \cdot \Delta K^m = 10^{-11} \cdot 220,2^3 = 1,067 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mm}}{\text{cyklus}}$$

$$\Delta N = \frac{\Delta a}{d_a/d_N} = \frac{0,102}{1,067 \cdot 10^{-4}} = 959 \text{ cyklů} \Rightarrow \sum N = 1960$$

3. přírůstek trhliny

$a=1,702\text{mm}$, $\Sigma N=1960$, $\Delta a=0,104\text{ mm}$, $\Delta K=230,2\text{ N}\cdot\text{mm}^{-3/2}$

$$\frac{d_a}{d_N} = A \cdot \Delta K^m = 10^{-11} \cdot 230,2^3 = 1,212 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mm}}{\text{cyklus}}$$

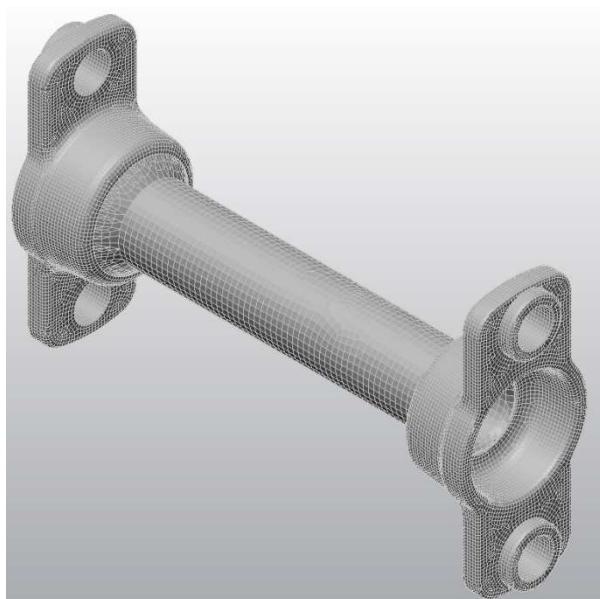
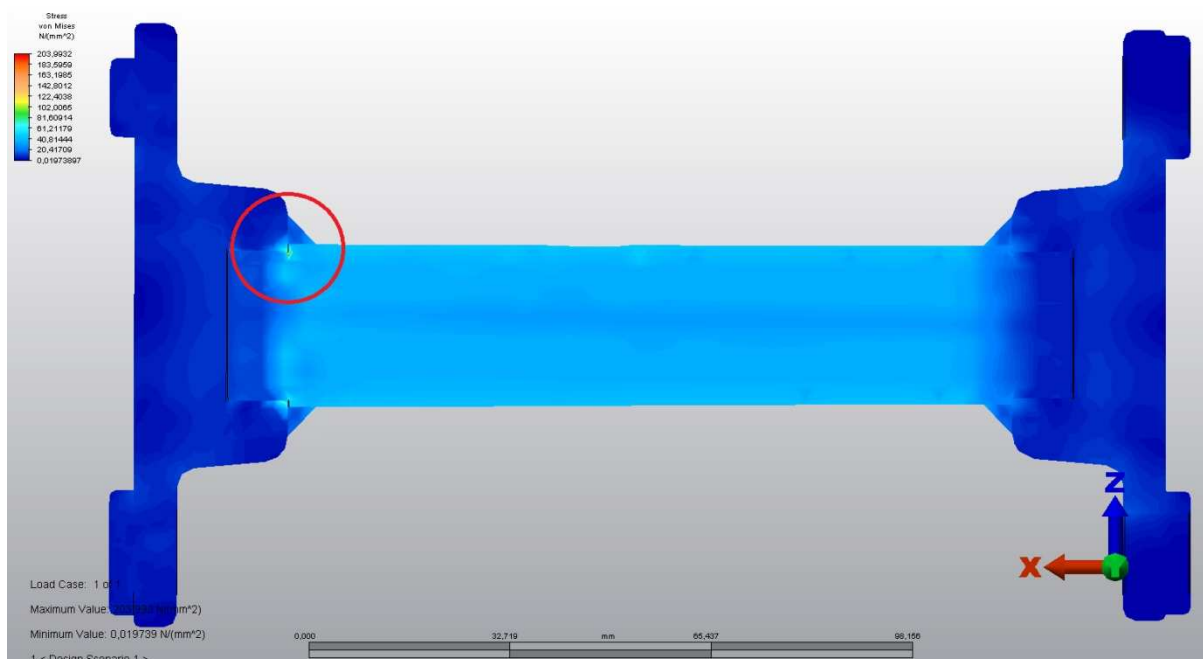
$$\Delta N = \frac{\Delta a}{d_a/d_N} = \frac{0,104}{1,212 \cdot 10^{-4}} = 853 \text{ cyklů} \Rightarrow \sum N = 2813$$

4. přírůstek trhliny

$a=1,806\text{mm}$, $\Sigma N=2813$, $\Delta a=0,106\text{ mm}$, $\Delta K=241,7\text{ N}\cdot\text{mm}^{-3/2}$

$$\frac{d_a}{d_N} = A \cdot \Delta K^m = 10^{-11} \cdot 241,7^3 = 1,411 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mm}}{\text{cyklus}}$$

$$\Delta N = \frac{\Delta a}{d_a/d_N} = \frac{0,106}{1,411 \cdot 10^{-4}} = 750 \text{ cyklů} \Rightarrow \sum N = 3563$$



Obr. B.2-1: Výpočtový model

Na obr. B.2-1 vidíme podélný řez hřídelem. Barevné pole představuje rozložení napětí von Mises, neboli ekvivalentní napětí v tahu. Je to skalární hodnota napětí, která je počítána z tenzoru napětí. Důraz je zde kladen na kontrast mezi napětovým polem v okolí místa s defektem a ve svaru bez defektu. Svar, kde došlo k porušení, je uvažován ve stavu po vodíkovém zkřehnutí, proto část svaru v simulaci nepřenáší žádná napětí.

B.3 Závěr

Podle tohoto výpočtu od iniciace porušení do okamžiku nestabilního šíření trhliny proběhlo 3563 cyklů. Přesný vztah mezi počtem cyklů a najetými kilometry sice není znám, ale je velice pravděpodobné, že se skutečně jednalo o nízkocyklovou únavu a k iniciaci došlo až po 100 000 najetých kilometrech. Tento jednoduchý výpočet slouží hlavně jako ukázka aplikace lomové mechaniky a výsledky této přílohy nebyly ve fraktografické analýze nijak zohledněny. Odhad podobné přesnosti by se dal provést také pátráním po datu opravy v prostoru s kompresorem, kdy mohlo dojít k zapříčinění následného otlaku, který způsobil přídatné cyklické namáhání.

PŘÍLOHA C



Příloha C: Snímky ze SEM ve vysokém rozlišení

Snímky lomových ploch, které se objevují v experimentální části hlavního dokumentu, jsou mnohdy opatřeny poznámkami přímo v obrazovém poli. Některé mohou být upraveny z hlediska kontrastu, světlosti, velikosti nebo také proporcionality. Takto „znehodnocené“ obrázky slouží hlavně pro rychlou orientaci ve vlastním textu. Navíc se mechanismus oblasti B nepodařilo jednoznačně objasnit. Z těchto důvodů je tedy velmi vhodné morfologii zmíněné oblasti zachovat v nejlepší dostupné kvalitě, která by mohla pomoci čtenáři ke zhodnocení platnosti závěrů uvedených v hlavní části práce.

Počet snímků:

9

Každý snímek obsahuje takovéto popisové pole:

SEM HV: 30.00 kV	WD: 25.4160 mm		VEGA\\ TESCAN
SEM MAG: 999 x	Det: SE Detector	50 μ m	
Date(m/d/y): 05/03/11		Digital Microscopy Imaging	

Jednotlivé popisky znamenají:

Popis

SEM HV: 30.00 kV

SEM MAG: 999x

Date(m/d/y): 05/03/11

WD: 25.4160 mm

Det: SE Detector

50 μ m

Význam

Urychlovací napětí elektronů 30 kV

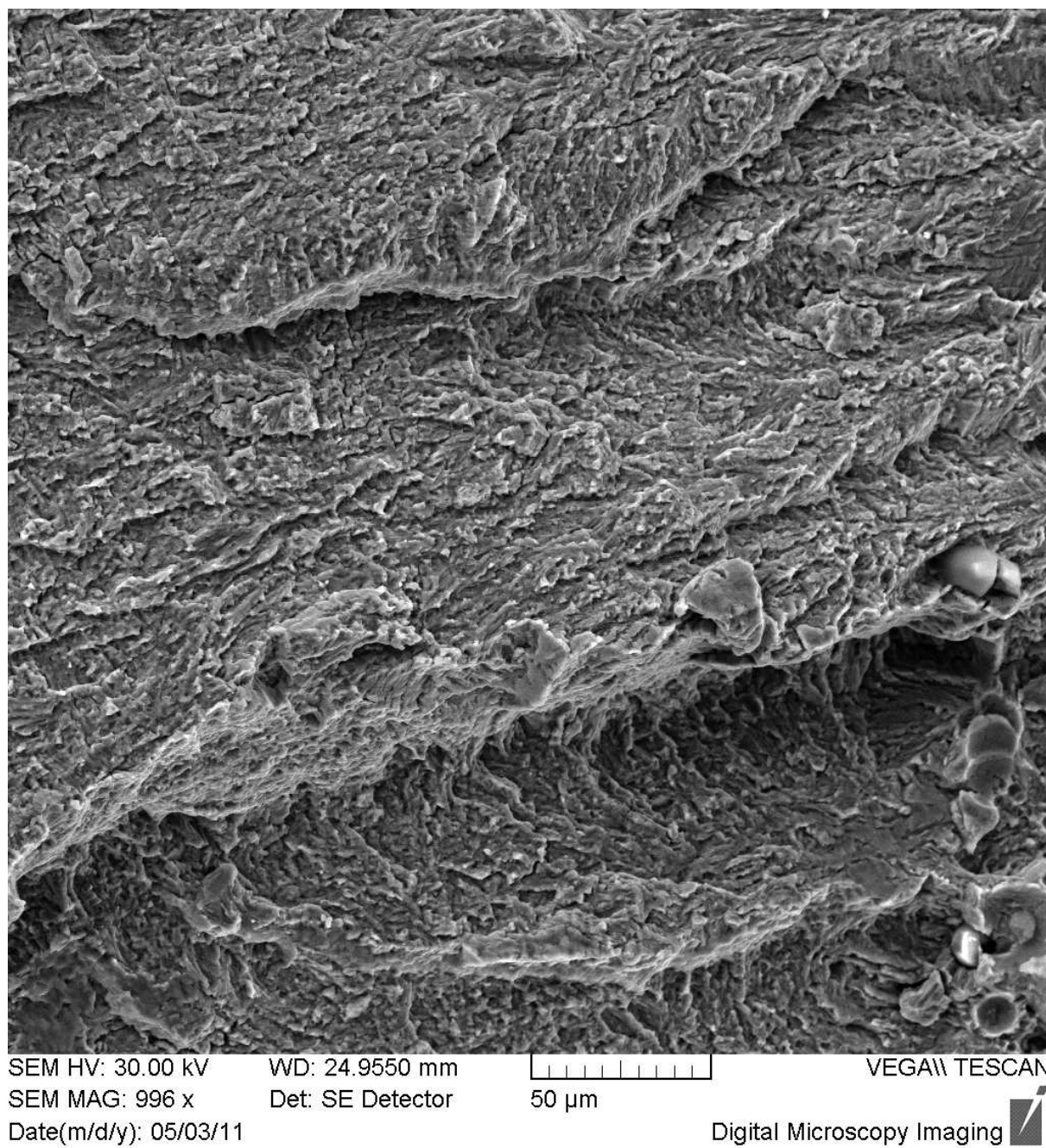
Zvětšení 999x

Datum 3. 5. 2011

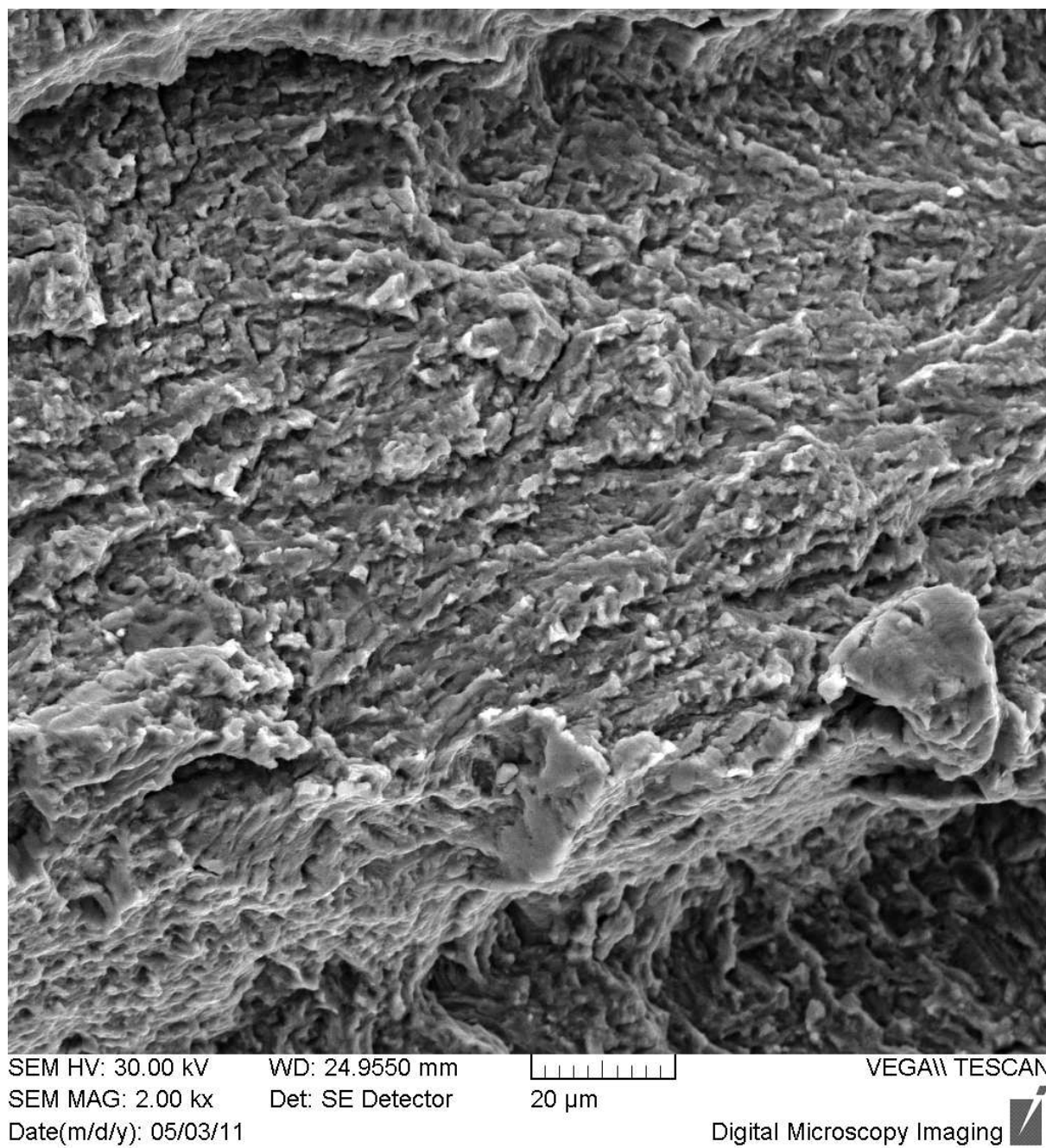
Pracovní vzdálenost 25,416 mm

Detektor sekundárních elektronů

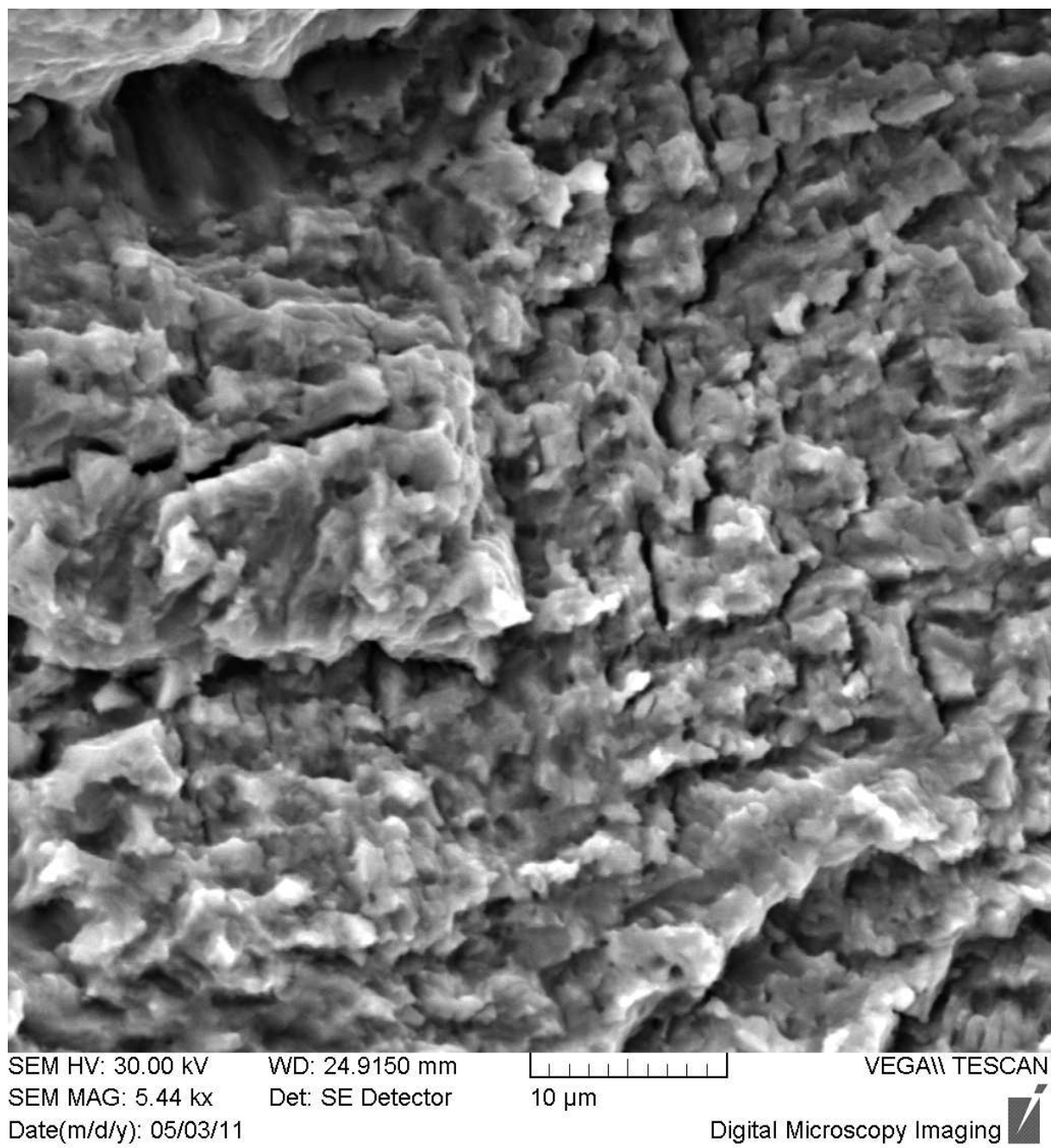
Měřítka (délka zakreslené úsečky je 50 μ m)



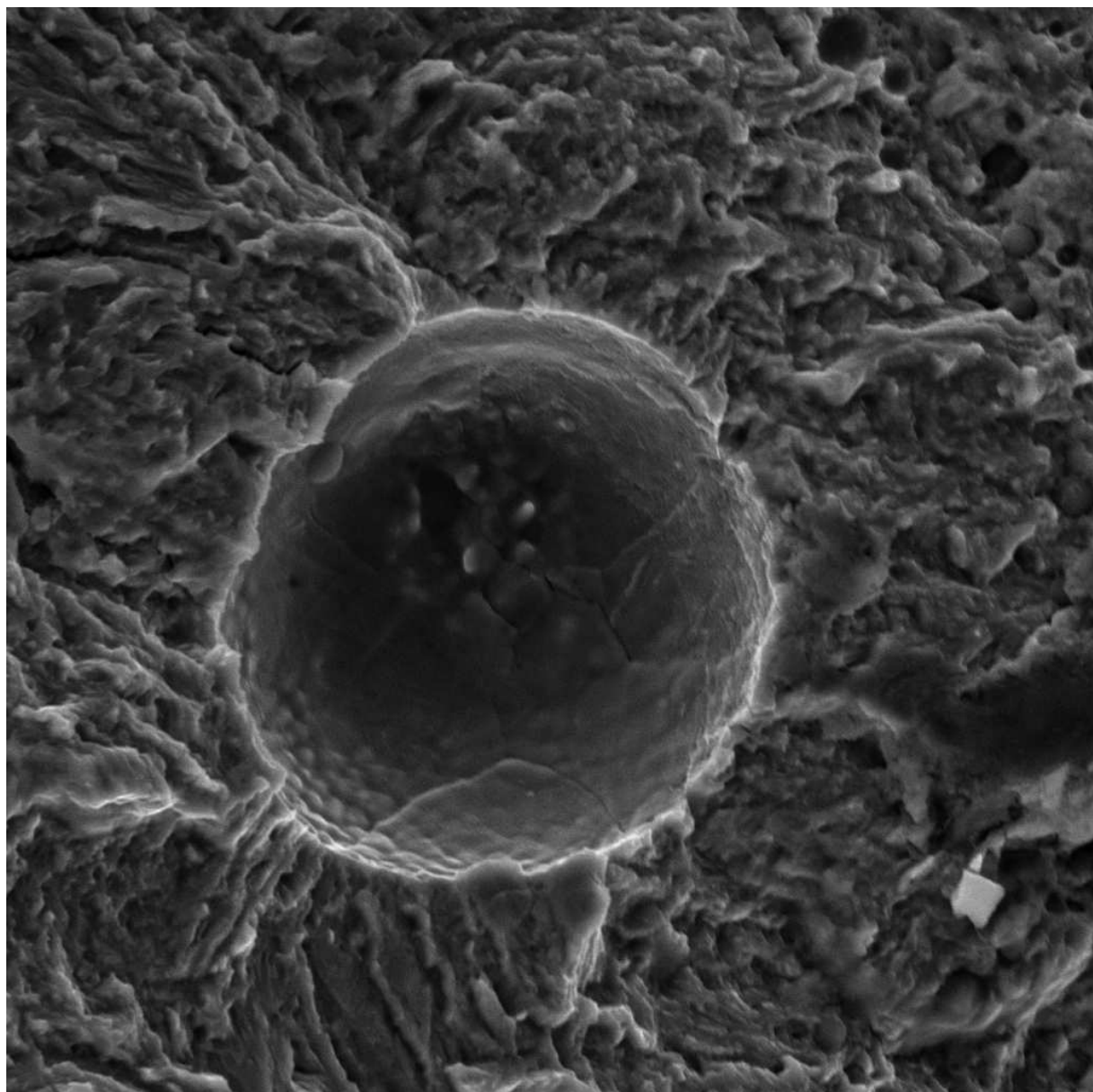
Obr. C- 1: Oblast B, 996x.



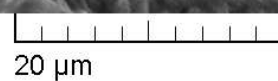
Obr. C- 2: Oblast B, 2000x.



Obr. C- 3: Oblast B, 5440x.



SEM HV: 30.00 kV WD: 19.9600 mm
SEM MAG: 3.21 kx Det: SE Detector
Date(m/d/y): 05/18/11

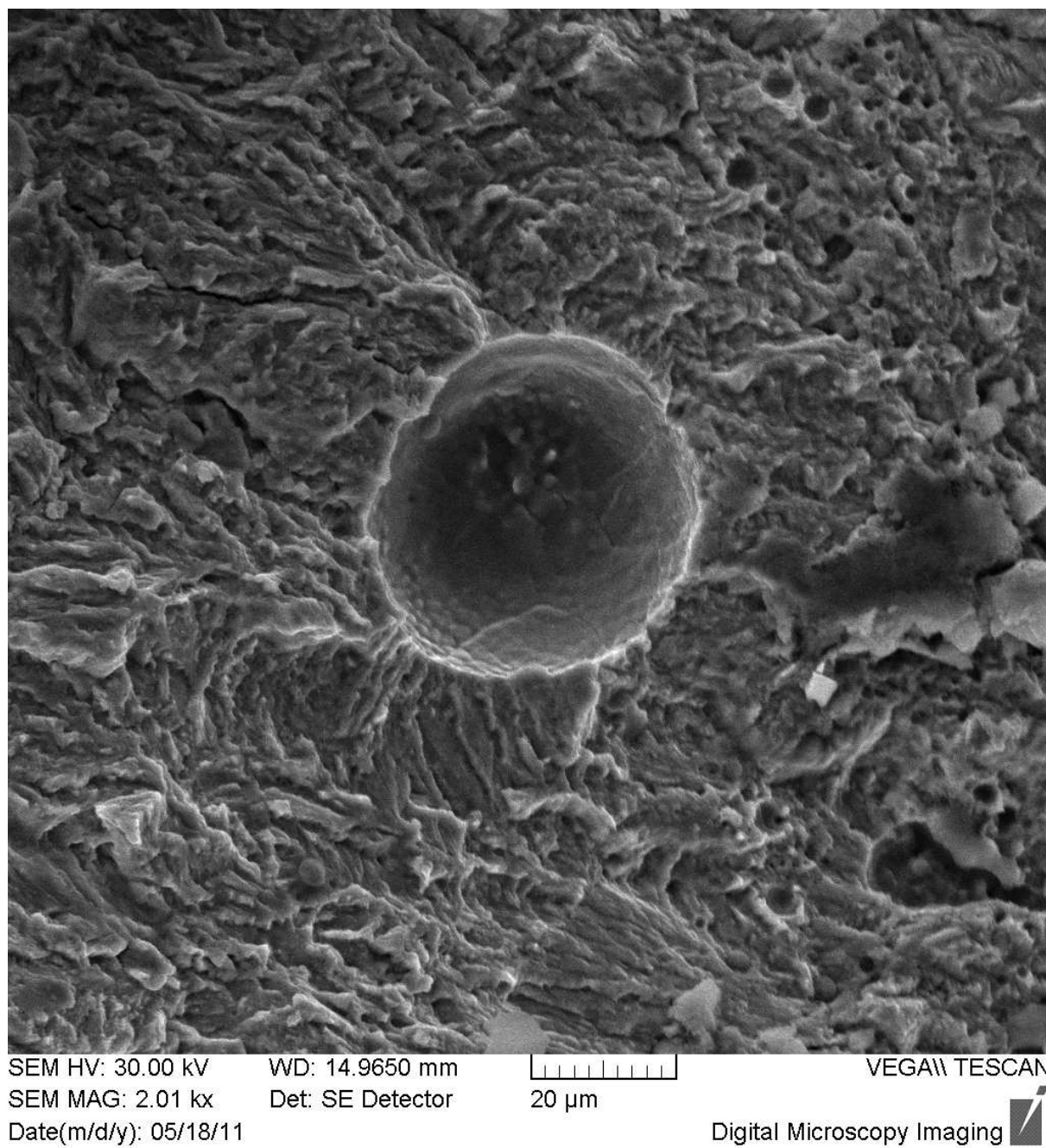


VEGA\\ TESCAN

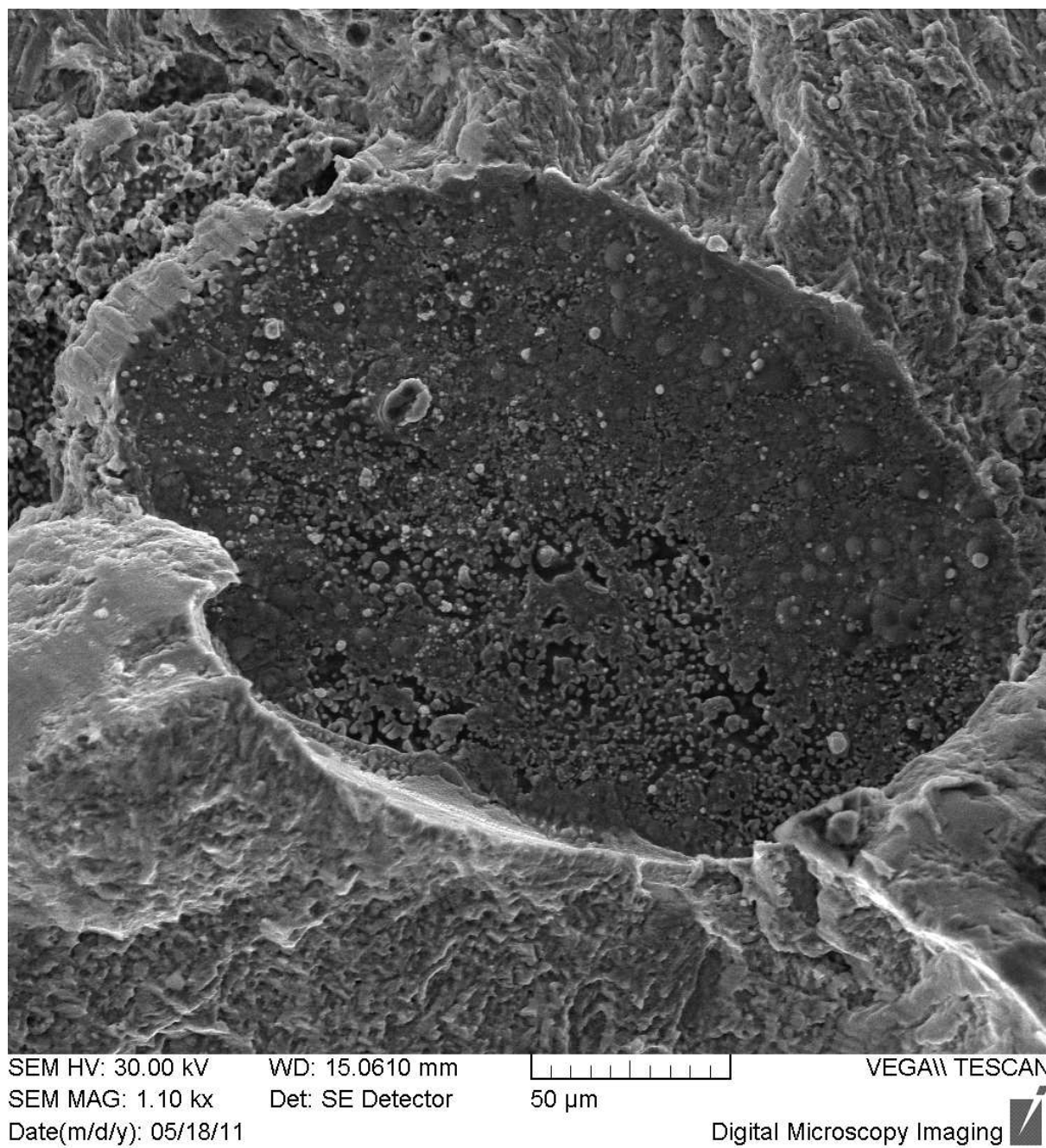
Digital Microscopy Imaging



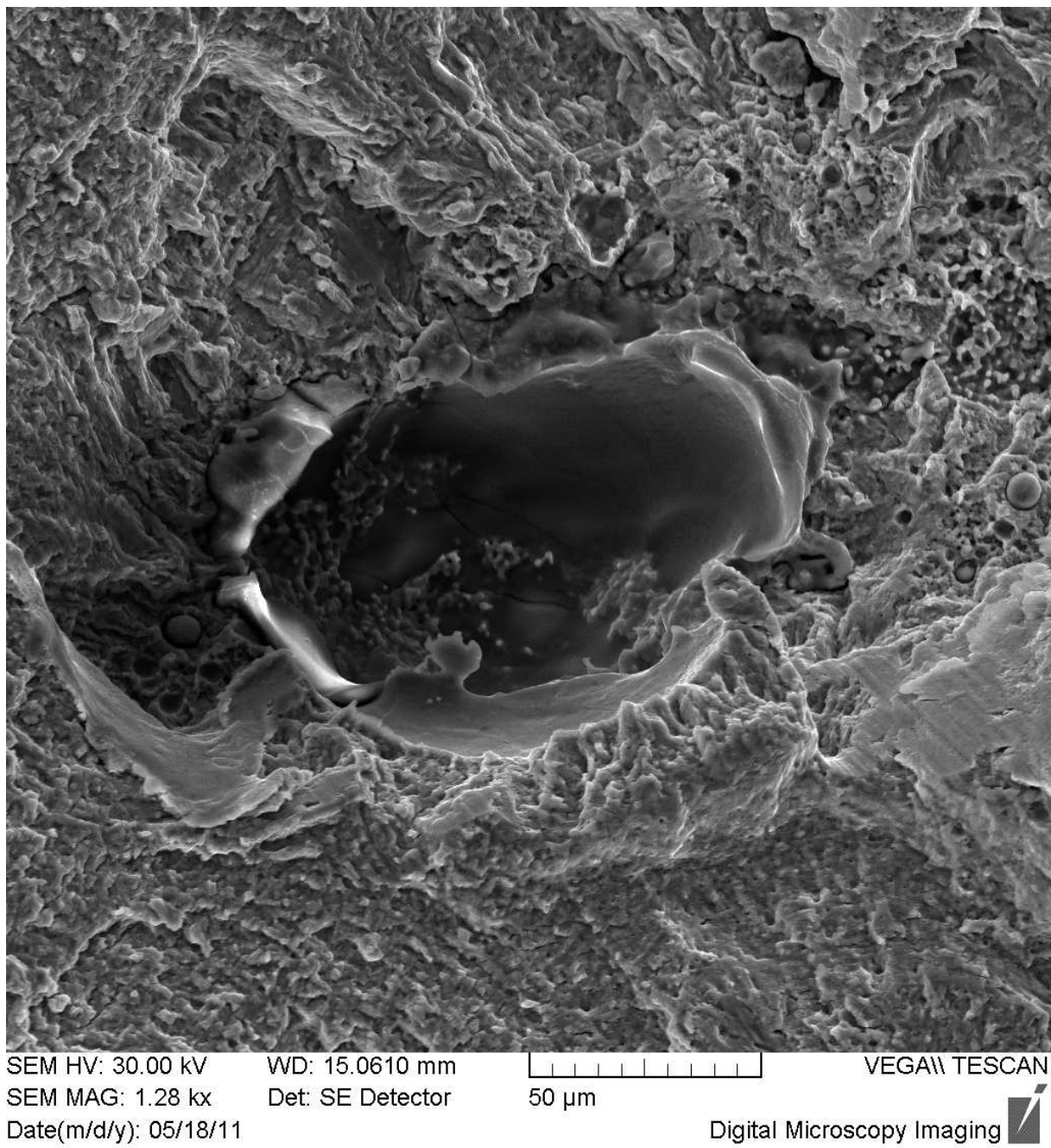
Obr. C- 4: Oblast B, 3210x.



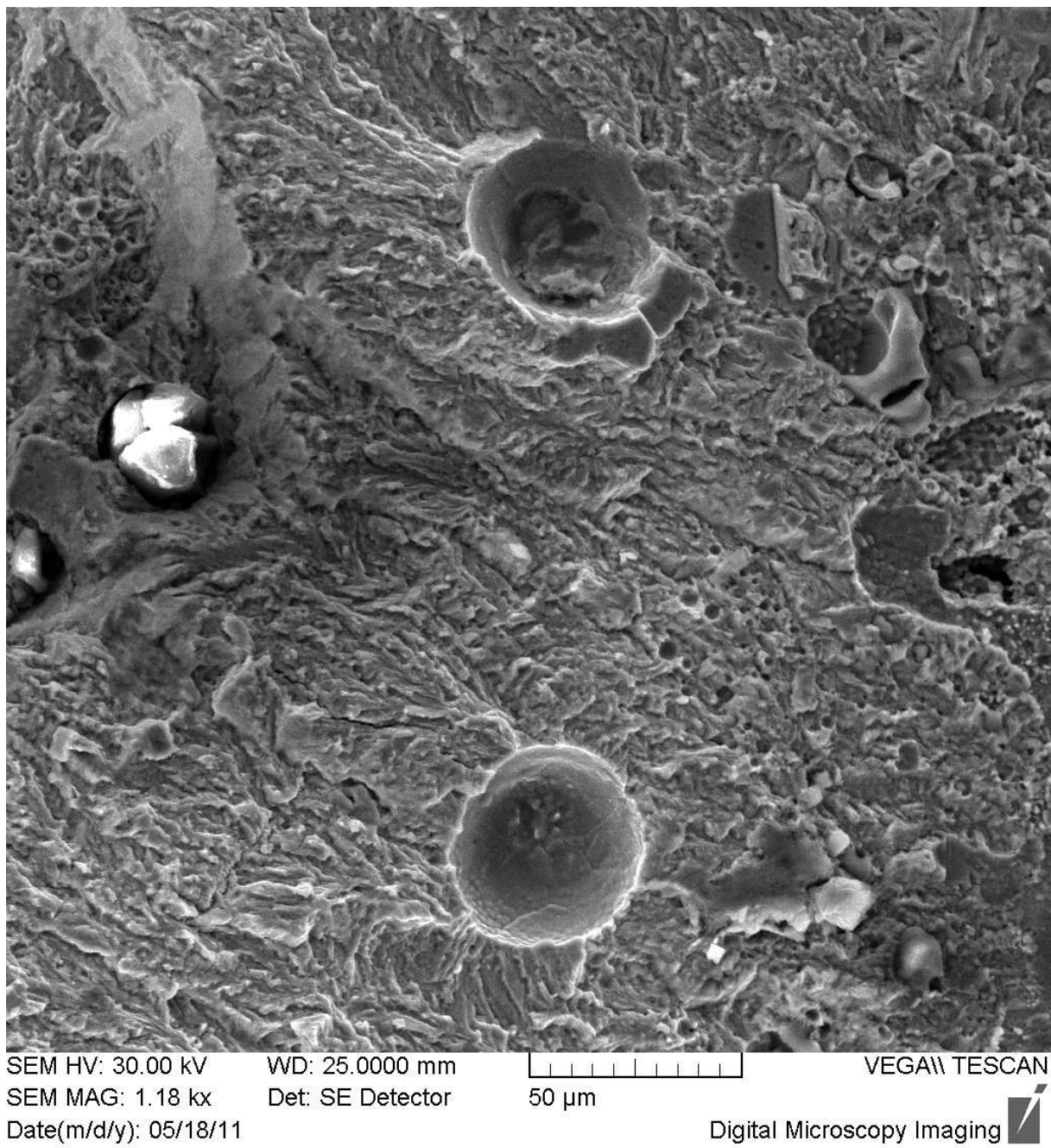
Obr. C- 5: Oblast B, 2010x.



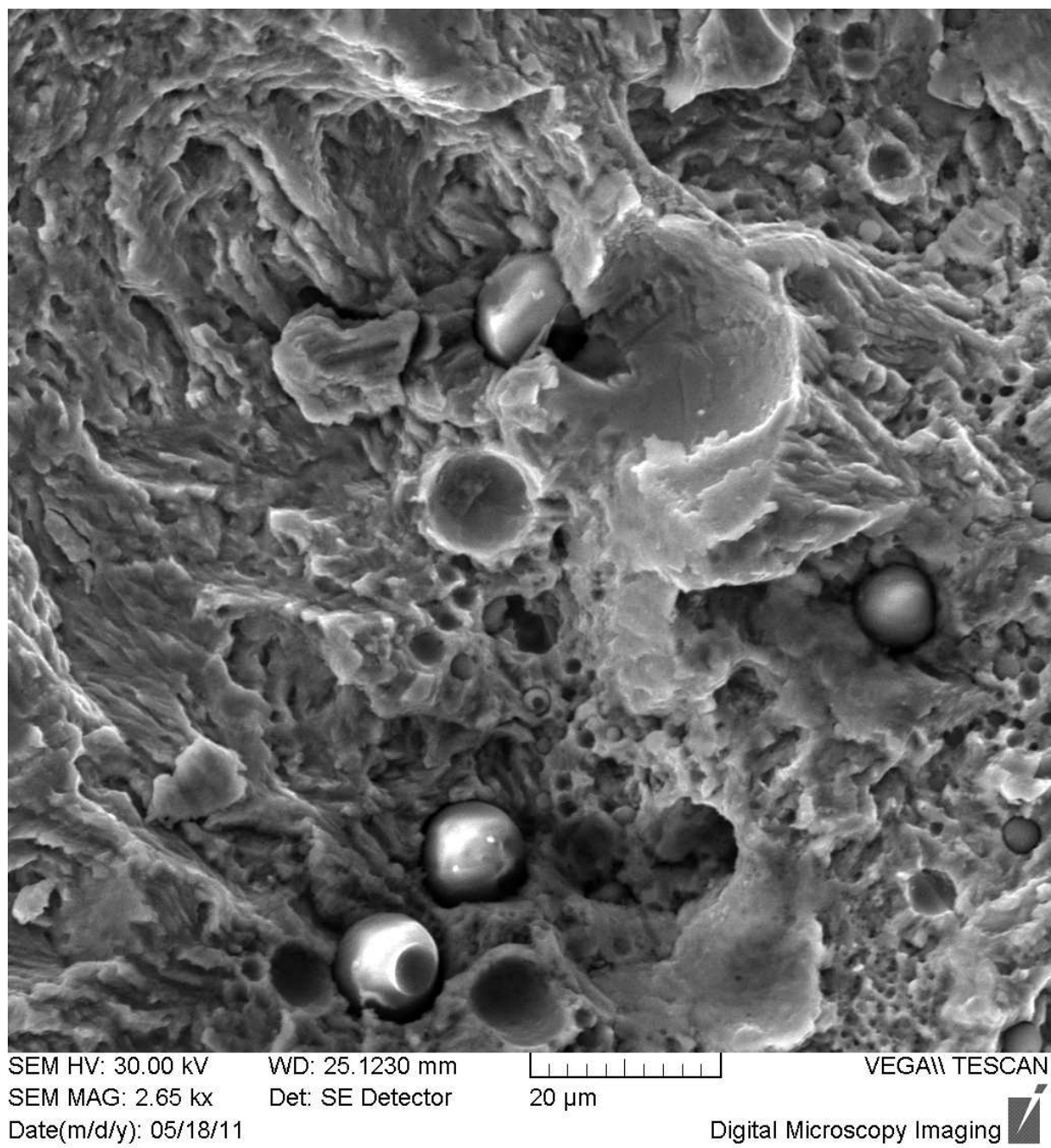
Obr. C- 6: Oblast B, 1100x.



Obr. C- 7: Oblast B, 1280x.



Obr. C- 8: Oblast B, 1180x.



Obr. C- 9: Oblast B, 2650x.